

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAVY VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMU A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

OPTIMALIZACE TVARU HÁKŮ V PECÍCH PETROCHEMICKÉHO PRŮMYSLU

OPTIMIZATION OF HANGER DESIGN IN PETROCHEMICAL INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LIBOR HORSÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Libor Horsák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukce strojů a zařízení (2302T010)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace tvaru háků v pecích petrochemického průmyslu

v anglickém jazyce:

Optimalization of hanger design in petrochemical industry

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cíle diplomové práce:

1. Seznámení se s řešenou problematikou.
2. Rozbor geometrických provedení háků pecí.
3. Stanovení způsobů zatížení.
4. Provedení optimalizace geometrie háku na základě způsobů zatížení.
5. Rozbor získaných výsledků řešení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kadrnožka J.: Tepelné elektrárny a teplárny, SNTL, Praha 1982
- [2] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999
- [3] ČSN EN 12 952 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 23.10.2009

L.S.

Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty



Abstrakt

Diplomová práce, „Optimalizace tvaru háku v pecích petrochemického průmyslu“, popisuje postup a prostředky, jež vedou k vhodnějšímu tvaru háků v rozličných případech. Práce zároveň popisuje různá úskalí, která je nutná u navrhování háků zohlednit. Jsou popsány různé tvary háků, které jsou posuzovány v širších souvislostech z technického hlediska. Je vybrán jeden typ háku, na kterém je postup optimalizace názorně předveden.

Klíčová slova:

Hák, petrochemická pec, metoda konečných řezů, zatěžovací síla, teplotní rozložení v peci – háku, creep, koeficient využití.

Abstract

Master's thesis, „Optimization of hanger design in petrochemical industry heaters“, describes a procedure and means, leading to better hanger design in various cases. The thesis describes several problems which are necessary to be solved in hanger design. Technical expertise is executed on hangers of various designs. The procedure of optimization is shown on one chosen hanger design.

Key words:

Hanger, petrochemical heater, finite cross-section method, load force, thermal distribution in heater – hanger, creep, utilization factor.



Bibliografická citace

HORSÁK, L. *Optimalizace tvaru háku v pecích petrochemického průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2010. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Optimalizace tvaru háku v pecích petrochemického průmyslu“ vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny prameny a literaturu.

V Brně 1.5. 2010

.....
Libor Horsák



Poděkování

Rád bych poděkoval: Vedoucímu mé diplomové práce Ing. Richardu Nekvasilovi, Ph.D. za zastřešení celé této mé činnosti. Ing. Petru Kuchyňovi za velmi podnětné a konstruktivní oponování při tvorbě diplomové práce. Ing. Františku Stejskalovi za inspiraci, podporu a sdílení mnohaletých zkušeností nejen v souvislosti s diplomovou prací. Svému zaměstnavateli CHEMPEX – HTE a.s. za umožnění studia při zaměstnání, za téma diplomové práce a za prostředky nezbytné k jejímu vypracování. Společnosti SolidWorks za poskytnutí software SolidWorks včetně modulů Simulace a FlowSimulace. V neposlední řadě děkuji své ženě Kateřině Horsákové nejen za textové a grafické korektury.



Obsah

Titulní list.....	1
Zadání VŠKP	3
Abstrakt.....	5
Bibliografická citace	6
Čestné prohlášení	7
Poděkování	8
Obsah	9
1 Úvod.....	10
2 Pece v petrochemickém průmyslu	11
2.1 Popis částí pece.....	13
3 Typy používaných háků	17
4 Postup navrhování háků	20
4.1 Obvyklý postup	20
4.2 Navrhovaný postup – optimalizace	20
5 Metoda konečných řezů (MKŘ).....	21
5.1 Zadávací údaje	21
5.2 Převod geometrie háku na funkce (h, l)	24
5.2.1 Oblast 1	25
5.2.2 Oblast 2	27
5.2.3 Oblast 3	28
5.2.4 Oblast 5	31
5.2.5 Oblast 6	34
5.3 Těžiště	37
5.4 Kvadratický moment háku.....	39
5.5 Ohybový moment háku, posouvající síla	41
5.6 Redukované napětí.....	44
5.7 Dovolené namáhání.....	52
5.7.1 Tečení materiálu (creep).....	53
5.7.2 Stanovení teploty háku	55
5.7.3 Dovolené namáhání háku v závislosti na délce l	56
5.8 Koeficient využití	57
5.9 Porovnání výsledků MKŘ – MKP	59
5.10 Zhodnocení MKŘ.....	60
5.10.1 Výhody.....	60
5.10.2 Nevýhody.....	60
6 Zatěžující síla	61
6.1 Zjednodušený předpoklad.....	61
6.2 Zpřesněný předpoklad	62
6.2.1 Nosník na n podporách.....	63
6.2.2 Vyosení potrubí	64
6.2.3 Vodorovná trubka	65
6.2.4 Vliv přesnosti určení zatížení háku	66
6.2.5 Pružný hák.....	67
7 Technologie výroby	69
8 Teplota háku	70
8.1 Metoda konečných objemů	71
9 Metoda konečných prvků (MKP)	75
9.1 Porovnání háků prostřednictvím výsledků z MKP	76
9.2 Vyhodnocení výsledků MKP	81
10 Závěr.....	82
11 Seznam Literatury	83
12 Seznam použitých veličin	84



1 Úvod

Hlavním úkolem této diplomové práce je rozbor problémů, jenž by měl vést k optimálnímu tvaru háků v petrochemických pecích. Tím je myšleno snížení hmotnosti při dodržení spolehlivého plnění funkce.

Petrochemické pece se dělí na ohřevné a reakční. Další členění je dle tvaru na válcové a šachtové. Všechny typy pecí spojuje princip uzavřeného tepelně izolovaného prostoru, který je uvnitř vyhříván plamenem. V tomto prostoru je rozveden potrubní svazek, v němž proudí ohříváné medium. Z důvodu vysoké teploty potrubí v pecích, která může dosahovat několik stovek stupňů Celsia, v extrémních případech i 1200°C, je nutné provést tepelně–dilatační pevnostní výpočet. K tomu je nutné znát parametry uložení. Potrubní svazek může být v peci uložen několika způsoby. Mezi nejčastější patří uložení prostřednictvím háků. Další způsoby uložení jsou pomocí pružinových závěsů, trubkovnic (příčná deska s otvory pro potrubí) nebo tzv. hřebenů (příčná deska s výstupky). Při ověřování parametrů háků bylo zjištěno, že žádné adekvátní výpočty háků nejsou k dispozici. To logicky vedlo k závěru, že tvar háků dokonce ani rozměry nikdy nebyly optimalizovány.

Vyvstaly dvě zásadní otázky. První, zda-li vůbec háky bezpečně plní svojí funkci. Při ztrátě funkce háků by došlo ke zborcení trubkového svazku, který je považován za tlakovou nádobu. Hodnoty vnitřního tlaku mohou být v řádu desítek MPa. Uvnitř proudí různě nebezpečná média např. vodní pára, ropné produkty, vodík atd. V potrubí je uzavřeno velké množství energie a v případě vzniku trhliny může nastat výbuch s fatálními následky, jak pro pec, tak pro přilehlé okolí. Druhá otázka je ekonomická. Materiál háků je chromniklová slitina, jejíž cena se pohybuje v tisících korun za jeden kilogram. Hmotnost háků je v desítkách kilogramů. Počet háků v jedné peci může být od několika desítek až po stovky ve velkých šachtových pecích. Z toho plyne, že úspora pouze jediného kilogramu materiálu háku může na celé peci ušetřit stovky tisíc korun a lepší rozložení hmoty háku zvýší jeho únosnost a tím i bezpečnost a spolehlivost provozu pece.

Hlavním cílem této diplomové práce není hledání ideálního tvaru konkrétního háku pro konkrétní situaci. Protože typy pecí a požadavky na háky jsou různorodé, je hlavním cílem nastínění postupu, který povede k co možná nejlepšímu technicko-ekonomickému řešení.

2 Pece v petrochemickém průmyslu

Trubkové pece jsou základními prvky většiny provozů v petrochemickém průmyslu. Dodávají mediu teplo, které je nezbytné pro řadu dějů např. parní reforming, katalytický reforming, atmosférická destilace, vakuová destilace, výroba páry, hydrokrak, visbreaking, pyrolýza atd.

Hořáky pece přeměňují chemickou energii paliva na energii tepelnou, která se šíří jednak radiací (zářením) a jednak konvekcí (prouděním spalin). Ohříváním médiem bývá např. voda, vodní pára, ropné frakce a jiné. V některých případech může být teplota media vysoká, dokonce i nad bodem vzplanutí. Medium je uzavřeno v trubkovém systému, který je ozařován plameny a obtékán proudem spalin. Z technologických důvodů bývá medium pod vysokým tlakem. Kombinace vysoké teploty a vysokého tlaku klade na trubkový systém vysoké nároky, které je nutno splnit.



Obr. 1 Válnová pec

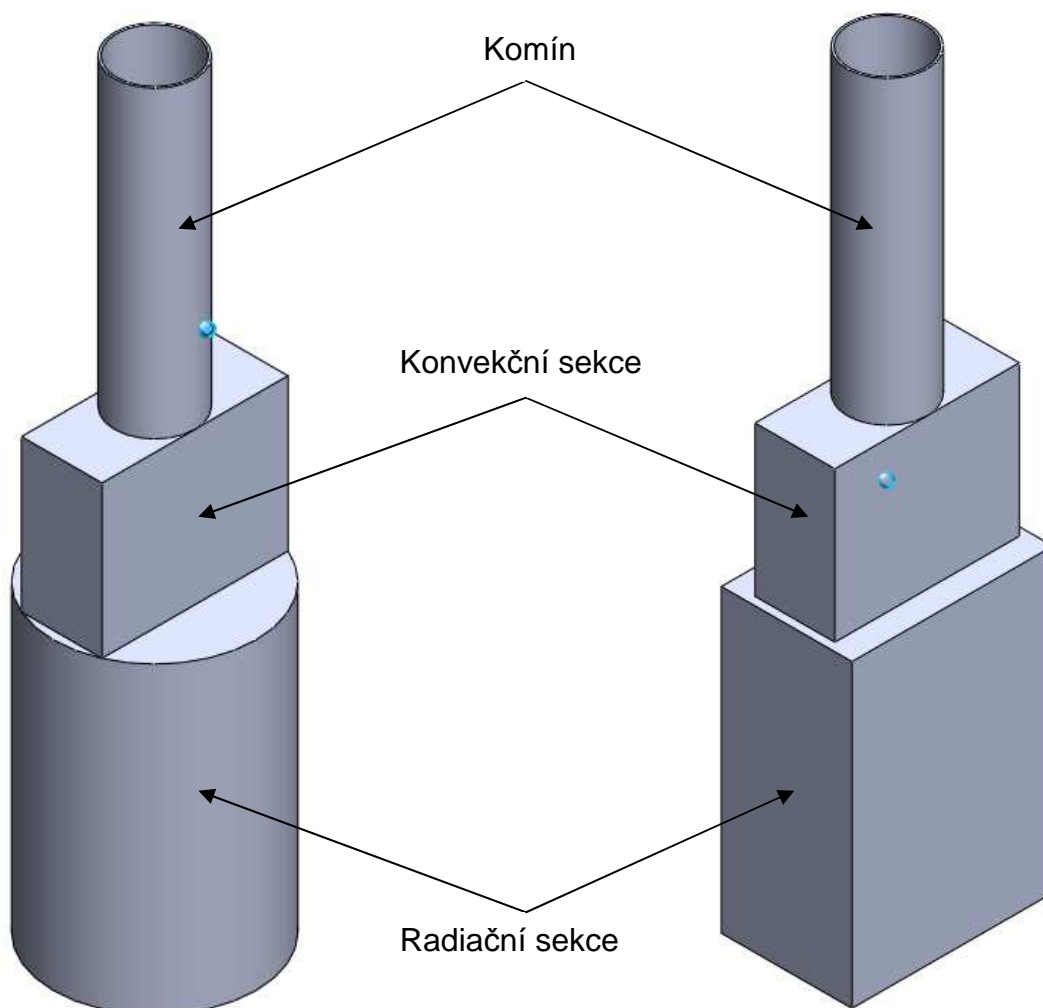


Obr. 2 Šachtová pec

Podle tvaru radiační komory dělíme pece na válcové a šachtové. Spalovací prostor válcové pece má tvar válce a u pece šachtové tvar kvádra. Ve válcové peci, je rozložení tepelného toku symetrické. Největší válcové pece dosahují výkonu cca 20 MW. Naproti tomu šachtové pece rozdělují svůj tepelný tok nerovnoměrněji, ale výkony přesahují 20 MW až do 50 MW. Při překročení obou hodnot pro jednotlivé typy pecí se výrazněji snižuje jejich účinnost. Je-li potřeba vyšších výkonů, postaví se dvě, případně více pecí vedle sebe. Např. Etylenová jednotka má deset pecí vedle sebe.

2.1 Popis částí pece

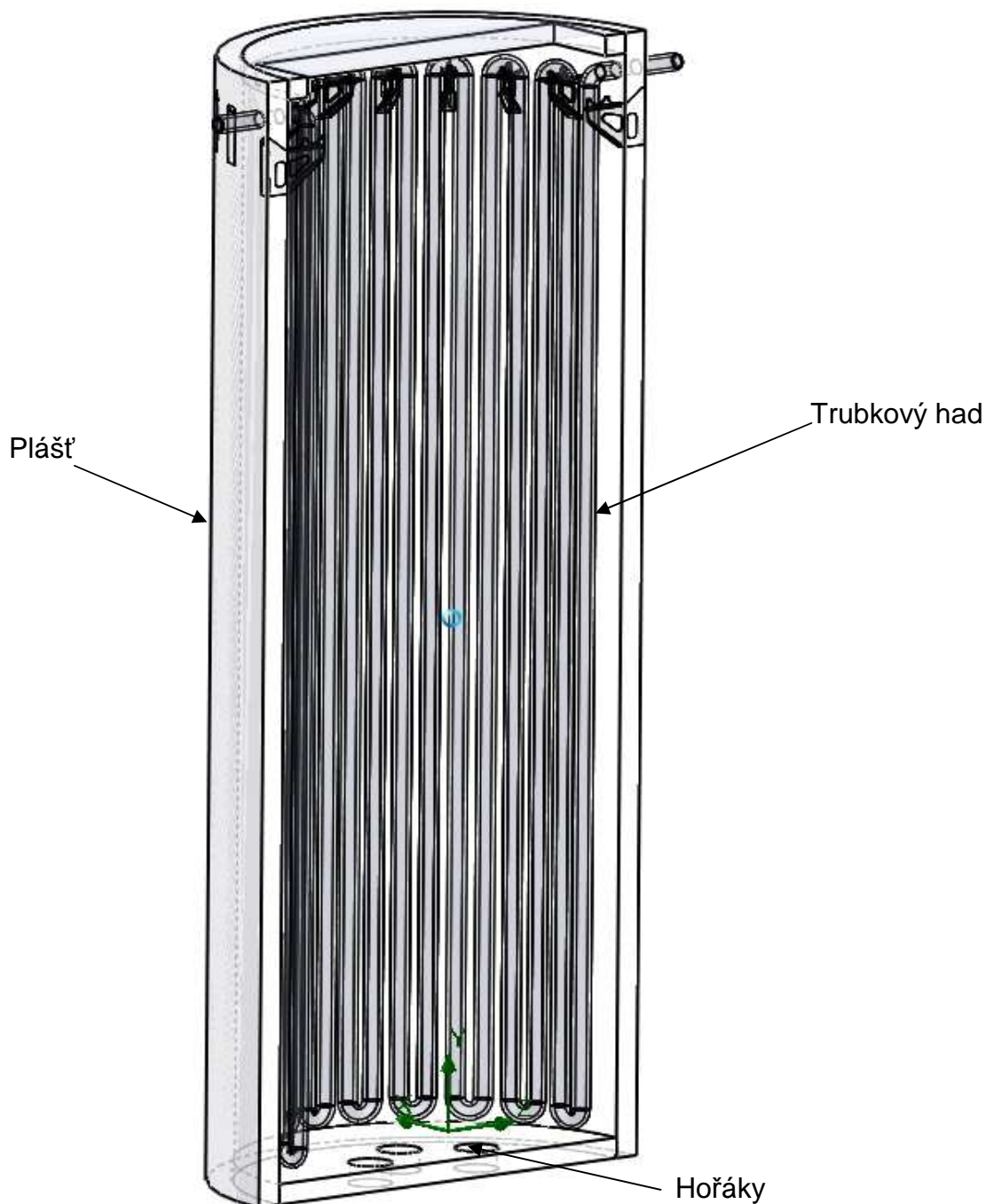
Pec je složena z několika základních částí, které jsou znázorněny na obr. 3, obr. 4 a obr. 7.



Obr. 3 Schéma pecí

Radiační sekce – (dále zkráceně radiace) je oblast pece, kde plameny vytvářejí radiační záření, které dopadá přímo na část trubkového systému. Přenos tepla v tomto prostoru je asi z 90% tvořen radiací a 10% prouděním spalin.

Konvekční sekce – (dále zkráceně konvekce) je oblast pece prostorově umístěná zpravidla nad radiací. V konvekci je další část trubkového svazku, který je ohříván spaliny, jež vystupují z radiace. Tepelná energie se předává konvekci. Díky konvekci se využije další část tepla spalin. To zvýší účinnost pece až o 30%.



Obr. 4 Schéma radiace

Plášť – je ocelová konstrukce, která nese všechny části pece.

Hořáky – jsou části pece, které připravují směs vzduchu a paliva pro hoření a kde probíhá hoření.

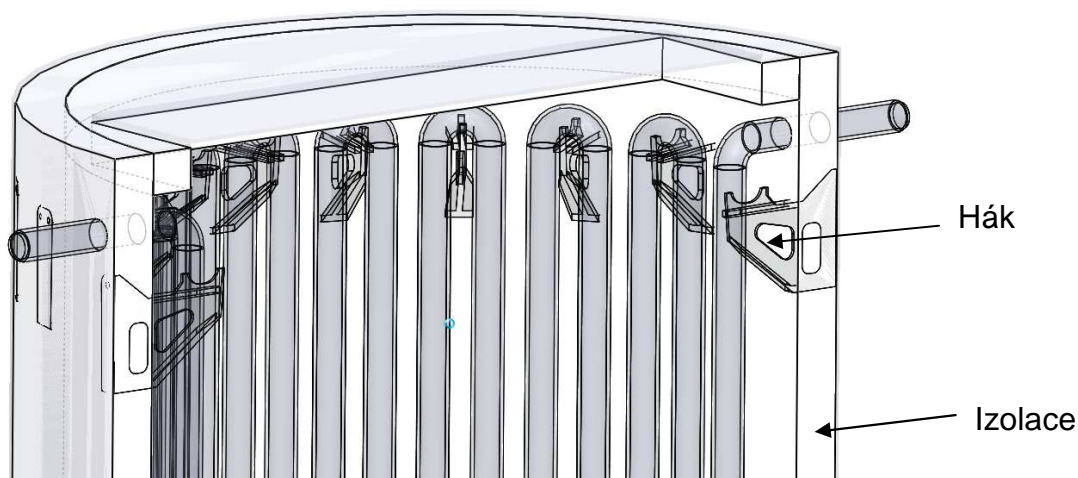
Trubkový systém – je sestava, jejíž součástí jsou trubky, kolena, oblouky, příruby, T-kusy, kolektory, vyztužení otvorů (weldolety, návarky) atd. Jednotlivé díly jsou k sobě svařeny a tvoří uzavřenou oblast, v níž proudí ohřívávané médium. Trubkový systém se také nazývá trubkový had nebo svazek.



Obr. 5 Radiační komora šachtové pece



Obr. 6 Radiační komora válcové pece



Obr. 7 Schéma části radiace

Izolace – je část pece, která odděluje plášť pece a vnitřní horký prostor pece. Izolace bývá pevná (speciální beton, vyzdívka) nebo vláknitá (minerální vata).

Proud – je část trubkového systému. Trubkový systém může být jedнопroudý nebo víceproudý. Před vstupem do prostoru pece je kolektor, ze kterého vystupuje několik souběžných trubek. Ty jsou pak paralelně rozvedeny v prostoru pece. Po prostupu peci se trubky opět spojí kolektorem. Víceproudé trubkové systémy se používají v případě, kdy je potřeba nižší tlaková ztráta.

Přestup – je část trubkového svazku, který spojuje potrubí v radiaci a konvekci.

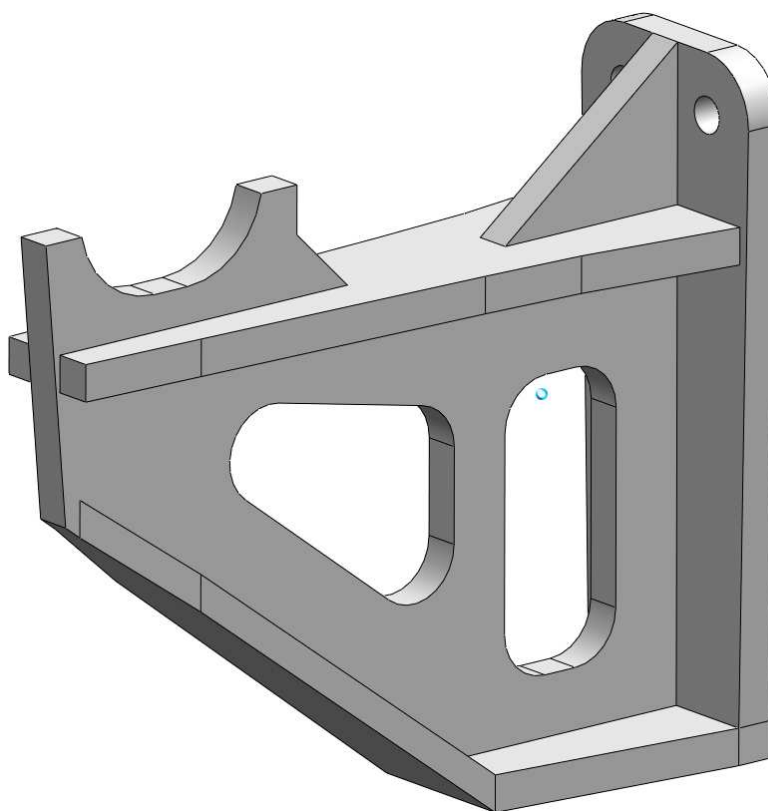
Hák – je část, pomocí níž je trubkový systém uchycen k plášti pece.

Pece v petrochemickém průmyslu obsahují ještě další části, ty však pro účely této diplomové práce nejsou podstatné.

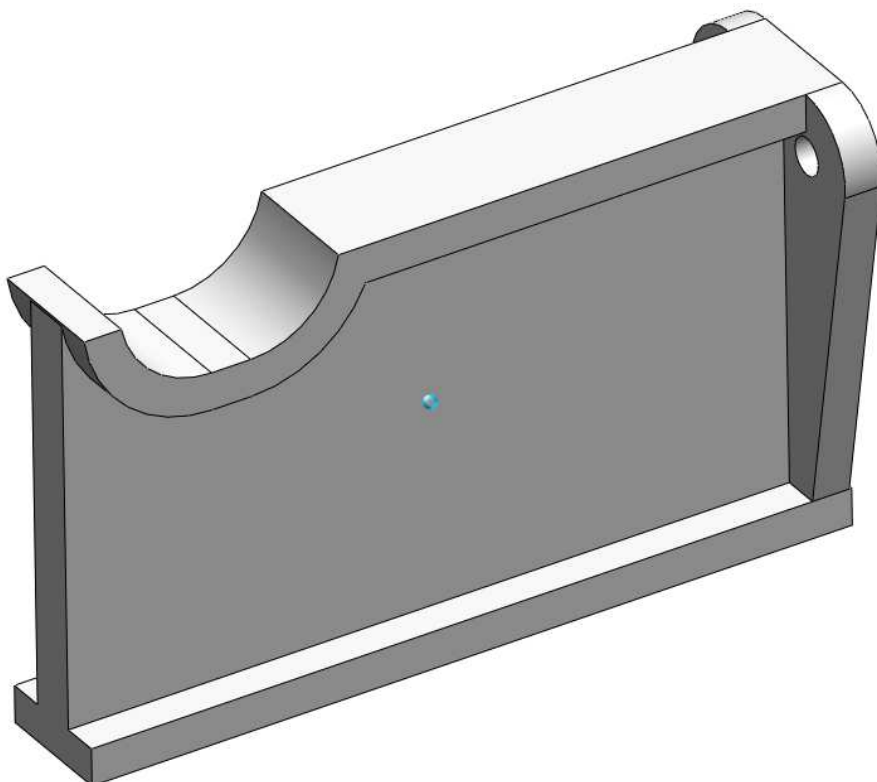
3 Typy používaných háků

V pecích se používají různé typy háků. Jednotlivé typy se vzájemně odlišují svojí geometrií, jak je patrné na obrázcích obr. 8 až obr. 12. Všechny typy háků mají ve skutečnosti zaoblené hrany, jednak kvůli technologii odlévání a jednak kvůli koncentracím napětí. Zjednodušené modely mají ostré hrany, které usnadňují analytický i numerický výpočet.

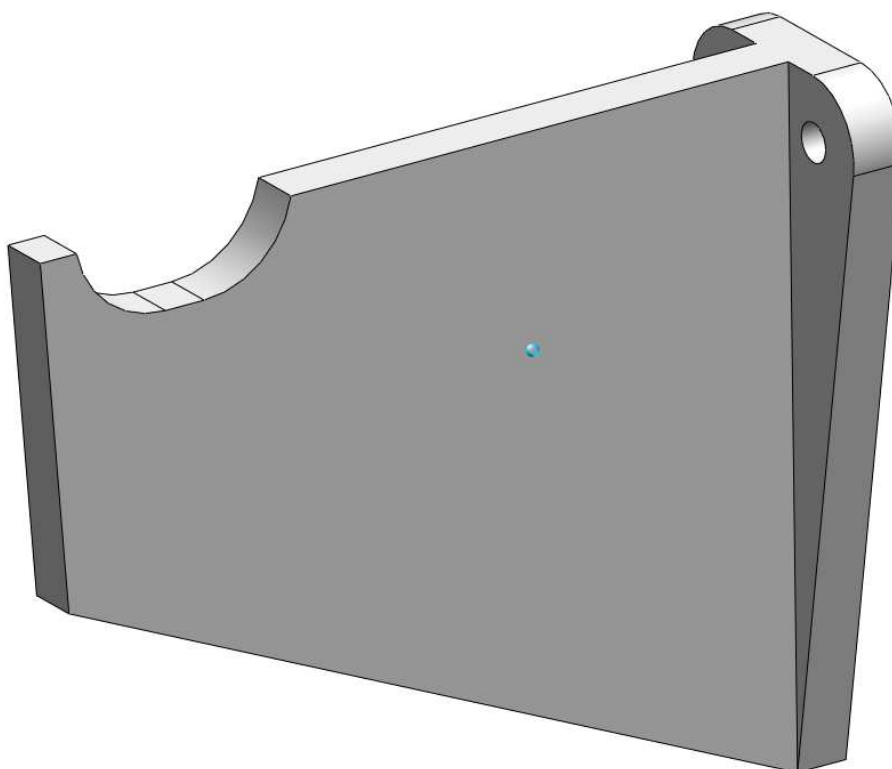
Tvar (geometrie, rozložení hmoty) háku má výrazný vliv na celkovou únosnost.



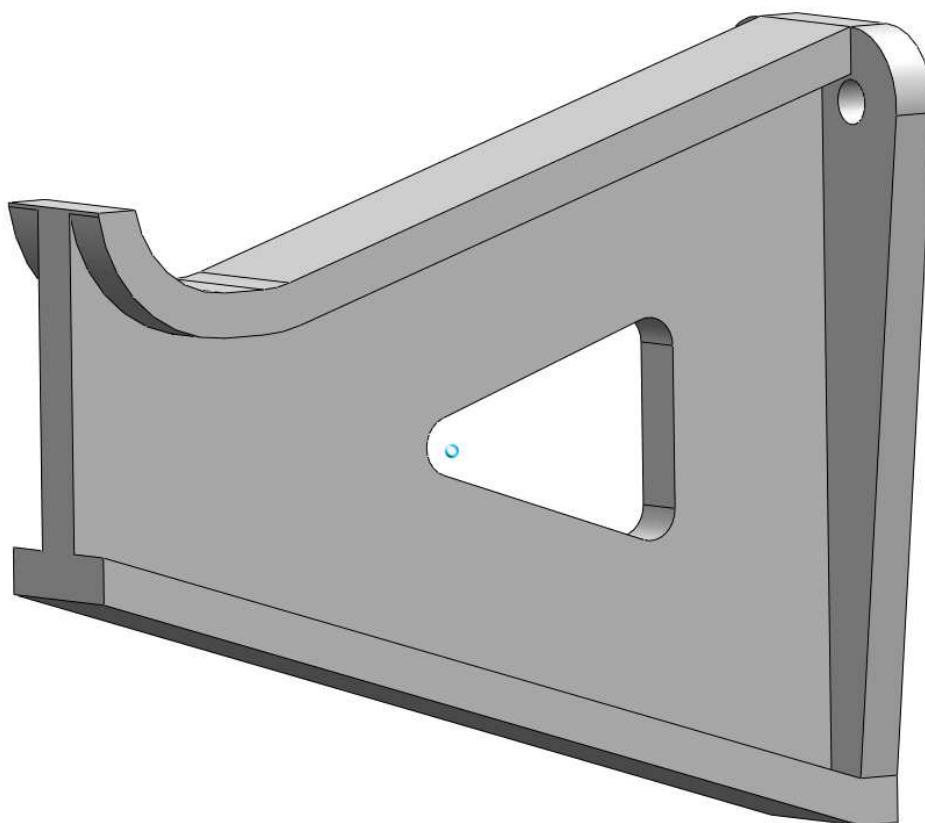
Obr. 8 Hák typ 1



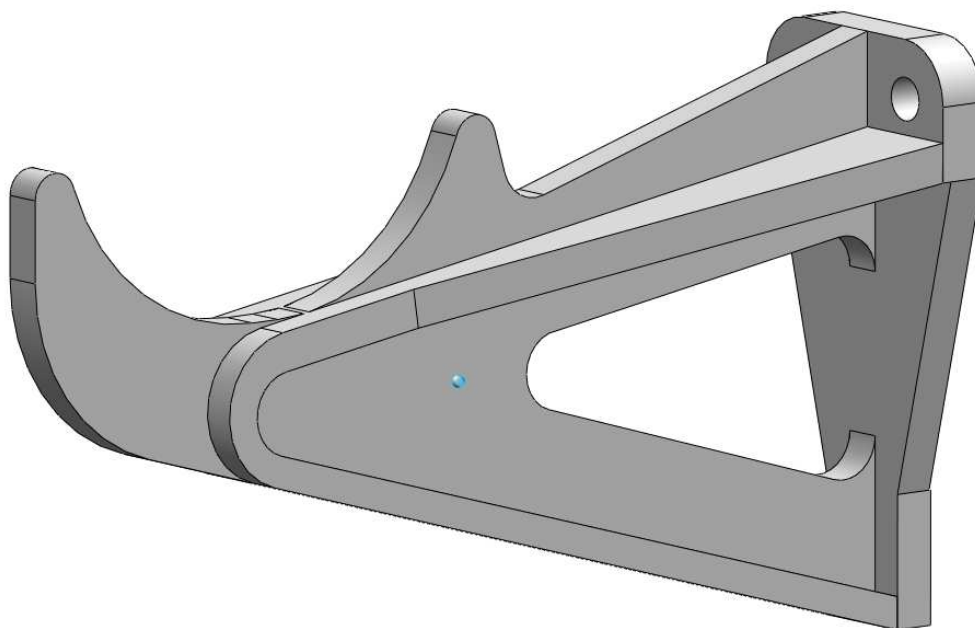
Obr. 9 Hák typ 2



Obr. 10 Hák typ 3



Obr. 11 Hák typ 4



Obr. 12 Hák typ 5



4 Postup navrhování háků

4.1 Obvyklý postup

V prvním kroku návrhu je zvolen určitý tvar háku, se kterým jsou dobré zkušenosti pro daný typ pece. Rozměry se určí na základě jednoduchého výpočtu, kdy se odhadne „kritický“ průřez háku. Pro něj se určí redukované napětí. Příslušná teplota pro hák je dána součtem jízkové teploty (nejvyšší teplota spalin v horní části radiace pece) a teplotního přídkvu cca 100°C. Z takto stanovené teploty se určí dovolené namáhání pro daný materiál. V případě, že redukované napětí v „kritickém“ průřezu nepřevyší dovolené namáhání, je návrh považován za vyhovující.

Problém tohoto přístupu spočívá v tom, že u složitého tvaru háku a složitých okrajových podmínek (bude popsáno dále v textu) je zvolený průřez spíše náhodný a ne kritický. Skutečně kritický průřez může zůstat neodhalen a podceněn.

4.2 Navrhovaný postup – optimalizace

Nový postup používá dva způsoby řešení:

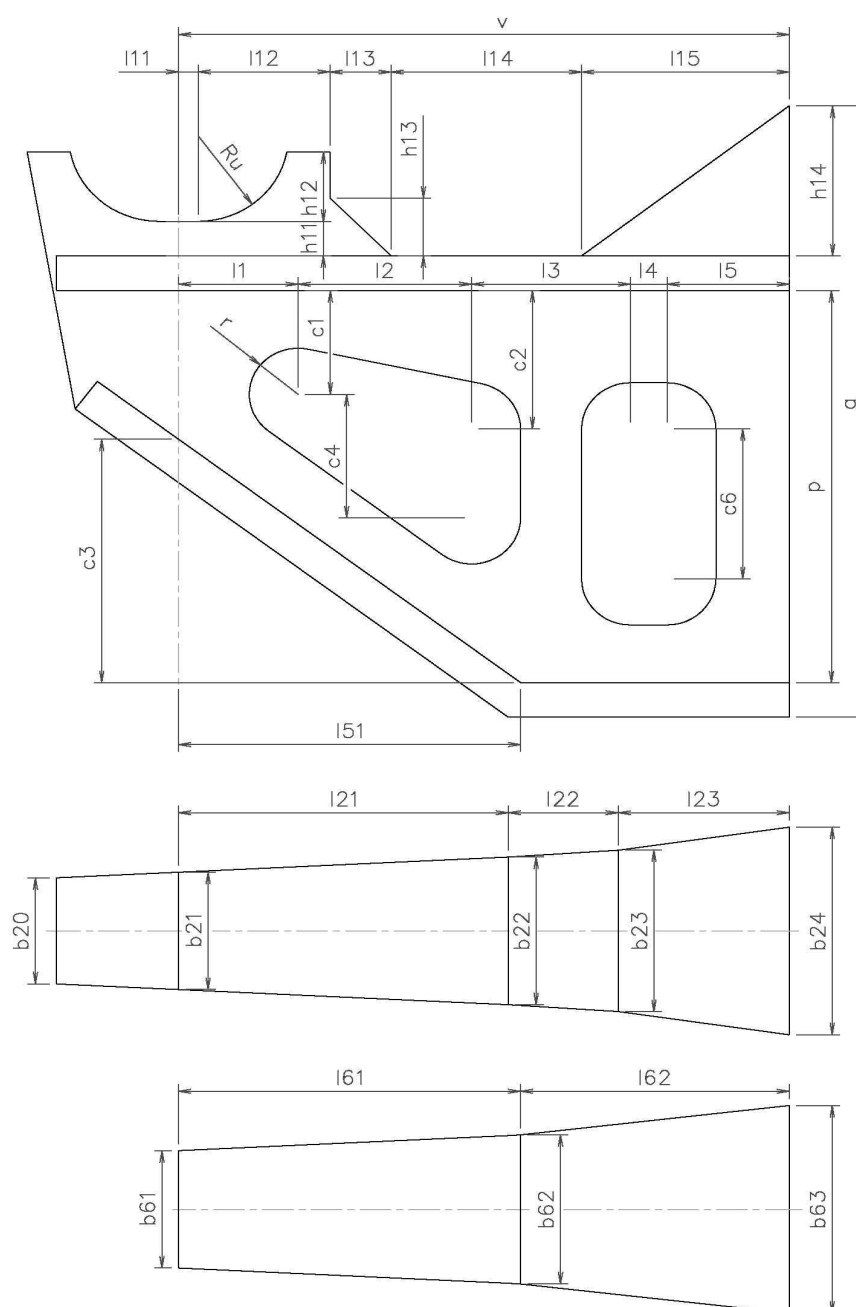
Analytický výpočet – je způsob řešení, který principiálně vychází z výše popsaného obvyklého postupu navrhování háků, avšak posuzuje více řezů rozložených po délce háku. Do určité míry eliminuje problémy postupu obvyklého. Obzvláště lokalizace kritického průřezu je náležitě ošetřena.

Numerický výpočet – je způsob řešení, který pro stanovení napjatosti háku používá metodu konečných prvků a pro stanovení rozložení teplot háku používá metodu konečných objemů.

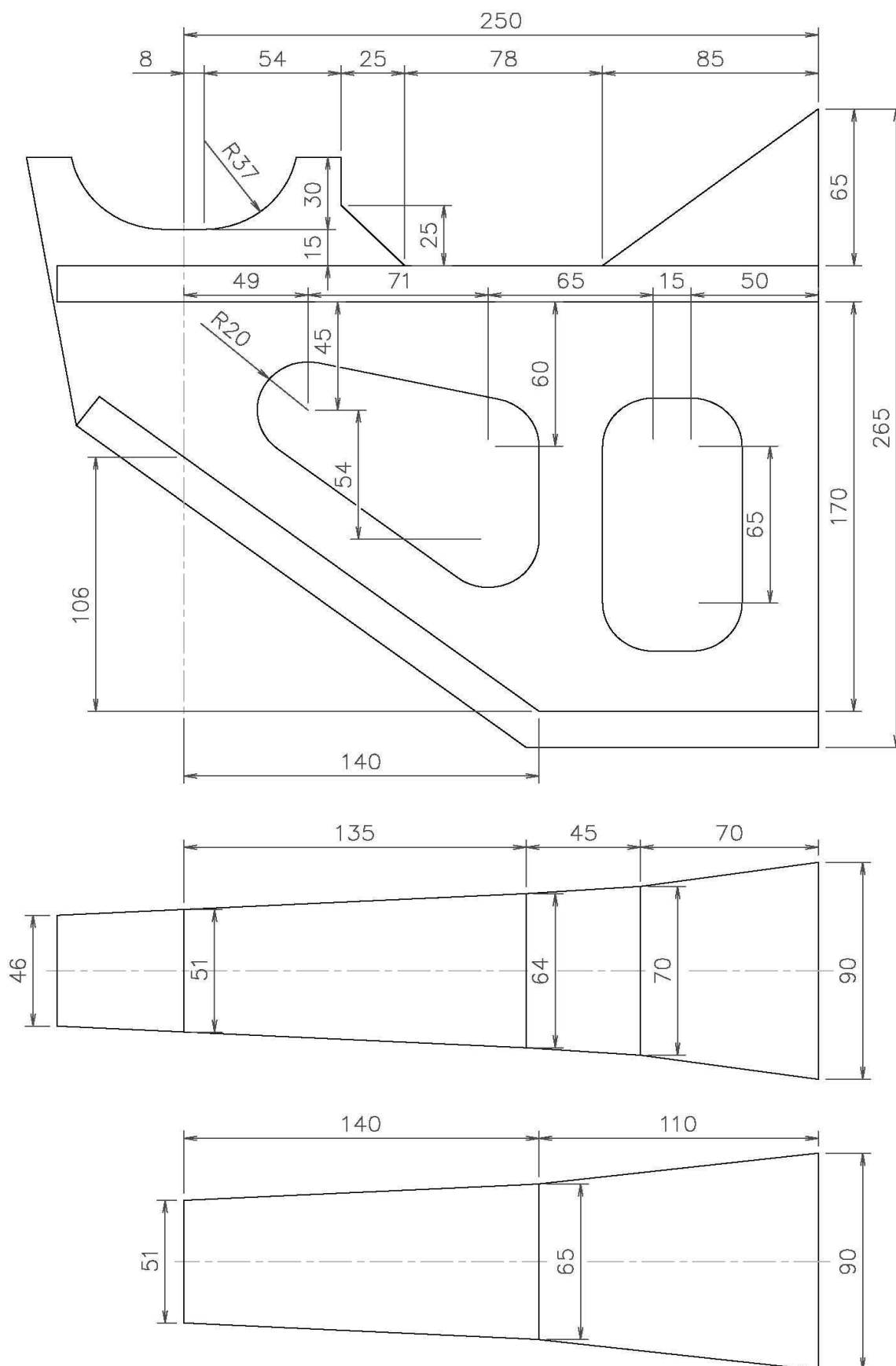
5 Metoda konečných řezů (MKŘ)

MKŘ je navrhovaný analytický postup výpočtu napjatosti a jejího posouzení, která ve svém důsledku vede k optimalizaci háku. Její princip spočívá v rozřezání háku na libovolný konečný počet řezů. Každým řezem vznikne plocha průřezu háku. U této plochy je určena poloha těžiště a kvadratický moment plochy. Poté lze vyjádřit smykové, ohybové i redukované napětí. Následným porovnáním s dovoleným namáháním je určen **koeficient využití**, který určí poddimenzované, vyhovující a předdimenzované části háku.

5.1 Zadávací údaje



Obr. 13 Parametrické schéma háku



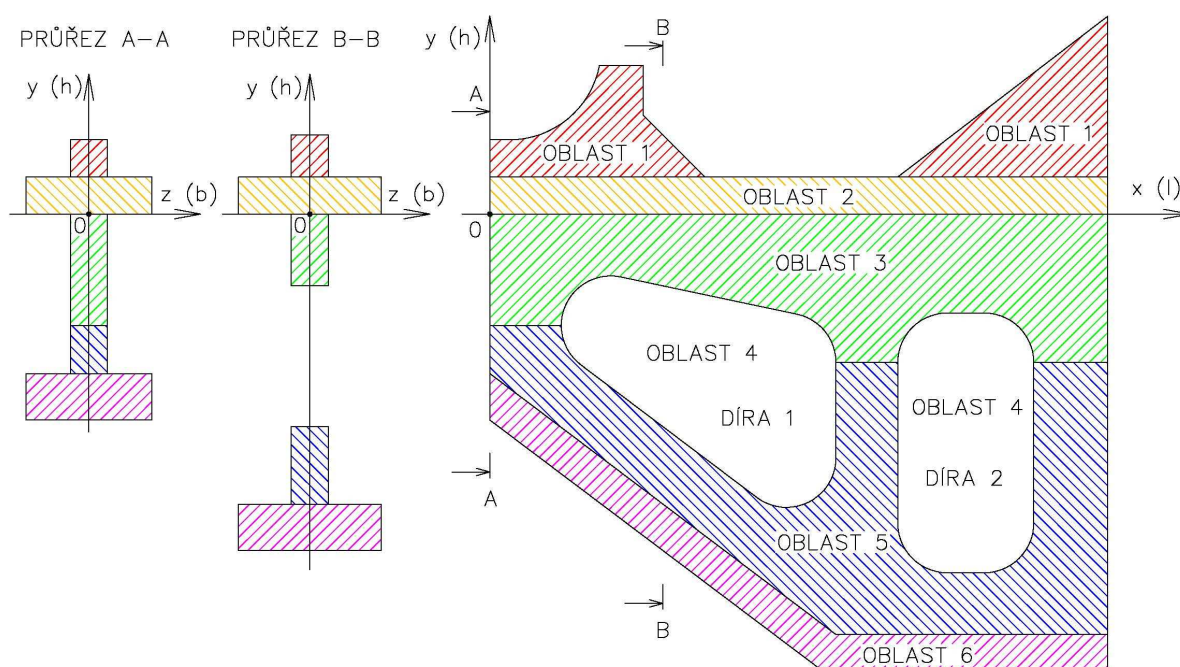
Obr. 14 Rozměrové schéma háku

Tab. 1 Velikost jednotlivých vstupních parametrů

Parametr	Hodnota	Jednotka
a	265	mm
b ₂₁	51	mm
b ₂₂	64	mm
b ₂₃	70	mm
b ₂₄	90	mm
b ₆₁	51	mm
b ₆₂	65	mm
b ₆₃	90	mm
c ₁	45	mm
c ₂	60	mm
c ₃	103	mm
c ₄	54	mm
c ₆	65	mm
e _s	1	mm
e _v	1	mm
h ₁₁	15	mm
h ₁₂	30	mm
h ₁₃	25	mm
h ₁₄	65	mm
i	0 až 250	
l ₁	49	mm
l ₁₁	8	mm
l ₁₂	54	mm
l ₁₃	25	mm
l ₁₄	78	mm
l ₁₅	85	mm
l ₂	71	mm
l ₂₁	135	mm
l ₂₂	45	mm
l ₂₃	70	mm
l ₃	65	mm
l ₄	15	mm
l ₅	50	mm
l ₅₁	140	mm
l ₆₁	140	mm
l ₆₂	110	mm
p	170	mm
r	20	mm
R _u	37	mm
v	250	mm

5.2 Převod geometrie háku na funkce (h , l)

Model háku je zjednodušen, jsou odstraněny části, které ve výpočtu MKŘ nejsou zatížené (špice háku). Zároveň je odstraněna deska, kterou se hák připevňuje na plášť pece. Tato deska je u všech typů podobná. Model je popsán v kartézském souřadném systému. Háček je rozdělen na několik útvarů. První rozdělení je po výšce. Tím vzniknou **oblasti** (obr. 15), které se dále dělí po délce na **podoblasti** (obr. 16 až obr. 20). Každá oblast i podoblast má své krajní meze a je popsána svou funkcí. Výsledná funkce oblasti je dána sjednocením jednotlivých funkcí podoblastí platných ve svých oborech. Následně funkce popisující celý háček je dána sjednocením jednotlivých funkcí oblastí platných ve svých oborech.



Obr. 15 Rozdělení na oblasti 1 až 6

Pod následujícími pojmy je rozuměno:

Délka – je horizontální vzdálenost hranice zvoleného parametru nebo veličiny od počátku souřadné soustavy. Vzdálenost je na ose x kolmá k rovině yz .

Výška – je vertikální vzdálenost hranice zvoleného parametru či veličiny od počátku souřadné soustavy. Vzdálenost je měřena na ose y kolmo k rovině xz .

Šířka – je horizontální vzdálenost mezi dvěma krajními body háku, které jsou symetrické k rovině xy . Vzdálenost je měřena na ose z .

Postup algebraického výpočtu

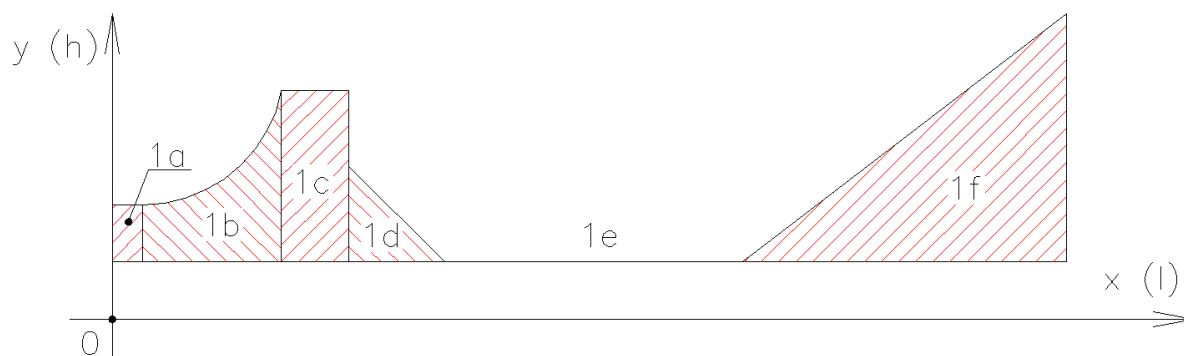
Počet analyzovaných rovin

$$n = \frac{v}{e_s} . \quad (1)$$

Rameno zatěžující síly

$$l = \frac{v^1}{n} . \quad (2)$$

5.2.1 Oblast 1



Obr. 16 Rozdělení oblasti 1 na podoblasti 1a až 1f

Délka podoblasti 1a

$$l_{1a} = l_{11} . \quad (3)$$

Délka podoblasti 1b

$$l_{1b} = l_{11} + \sqrt{R_u^2 - (R_u - h_{12})^2} . \quad (4)$$

Délka podoblasti 1c

$$l_{1c} = l_{1a} + l_{12} . \quad (5)$$

Délka podoblasti 1d

$$l_{1d} = l_{1c} + l_{13} . \quad (6)$$

Délka podoblasti 1e

$$l_{1e} = l_{1d} + l_{14} . \quad (7)$$

Délka podoblasti 1f

$$l_{1f} = l_{1e} + l_{15} . \quad (8)$$

Výška podoblasti 1a

$$h_{1a} = t + h_{11} . \quad (9)$$

Výška podoblasti 1b

$$h_{1b} = t + h_{11} + R_u - \sqrt{R_u^2 - (l - l_{11})^2} . \quad (10)$$

Výška podoblasti 1c

$$h_{1c} = t + h_{11} + h_{12}. \quad (11)$$

Výška podoblasti 1d

$$h_{1d} = t + h_{13} - \frac{l_{13}}{h_{13}}(l - l_{1b}). \quad (12)$$

Výška podoblasti 1e

$$h_{1e} = t. \quad (13)$$

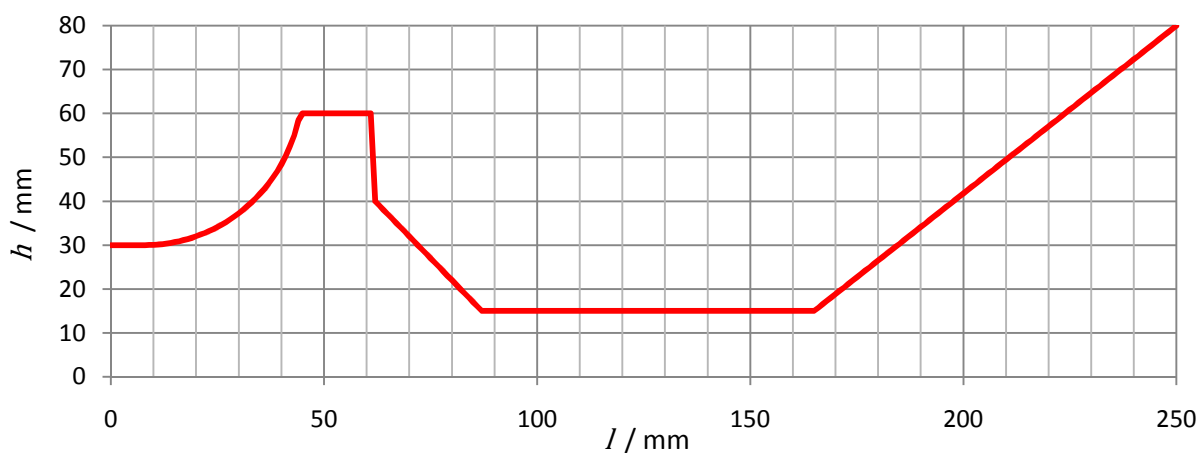
Výška podoblasti 1f

$$h_{1f} = t + \frac{l_{15}}{h_{14}}(l - l_{1e}). \quad (14)$$

Horní výška oblasti 1

Tab. 2 Závislosti hodnoty horní výšky h_{h1} na délce ramene l

l	$\langle 0; l_{1a} \rangle$	$\langle l_{1a}; l_{1b} \rangle$	$\langle l_{1b}; l_{1c} \rangle$	$\langle l_{1c}; l_{1d} \rangle$	$\langle l_{1d}; l_{1e} \rangle$	$\langle l_{1e}; l_{1f} \rangle$
h_{h1}	h_{1a}	h_{1b}	h_{1c}	h_{1d}	h_{1e}	h_{1f}



Graf 1 Závislost hodnoty horní výšky h_{h1} na délce ramene l

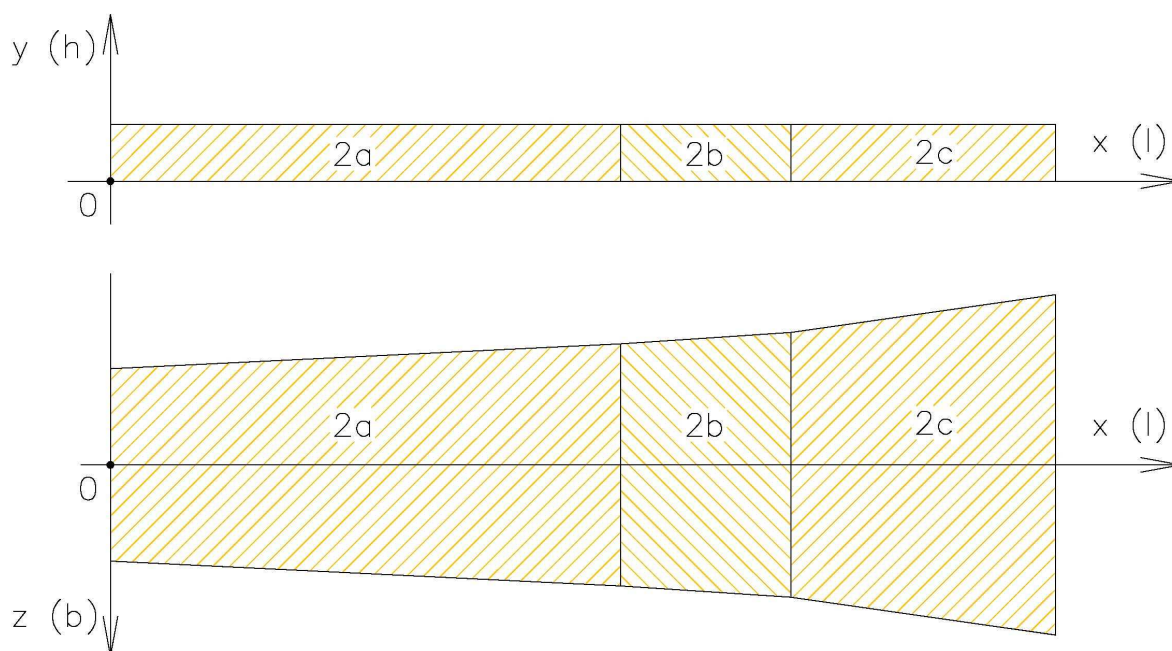
Spodní výška oblasti 1

$$h_{s1} = t. \quad (15)$$

Šířka oblasti 1

$$b_1 = t. \quad (16)$$

5.2.2 Oblast 2



Obr. 17 Rozdělení oblasti 2 na podoblasti 2a až 2c

Horní výška oblasti 2

$$h_{h2} = t. \quad (17)$$

Spodní výška oblasti 2 (totožná s osou „x“)

$$h_{s2} = 0. \quad (18)$$

Délka podoblasti 2a

$$l_{2a} = l_{21}. \quad (19)$$

Délka podoblasti 2b

$$l_{2b} = l_{2a} + l_{22}. \quad (20)$$

Délka podoblasti 2c

$$l_{2c} = l_{2b} + l_{23}. \quad (21)$$

Šířka podoblasti 2a

$$b_{2a} = b_{21} + l \frac{b_{22} - b_{21}}{l_{21}}. \quad (22)$$

Šířka podoblasti 2b

$$b_{2b} = b_{22} + (l - l_{21}) \frac{b_{23} - b_{22}}{l_{22}}. \quad (23)$$

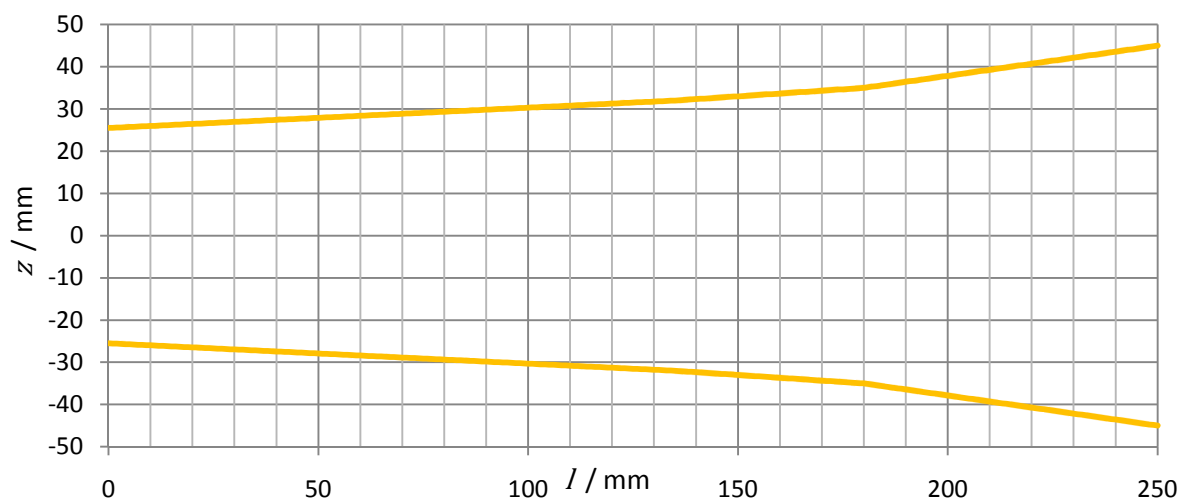
Šířka podoblasti 2c

$$b_{2c} = b_{23} + (l - l_{21} - l_{22}) \frac{b_{24} - b_{23}}{l_{23}}. \quad (24)$$

Šířka oblasti 2

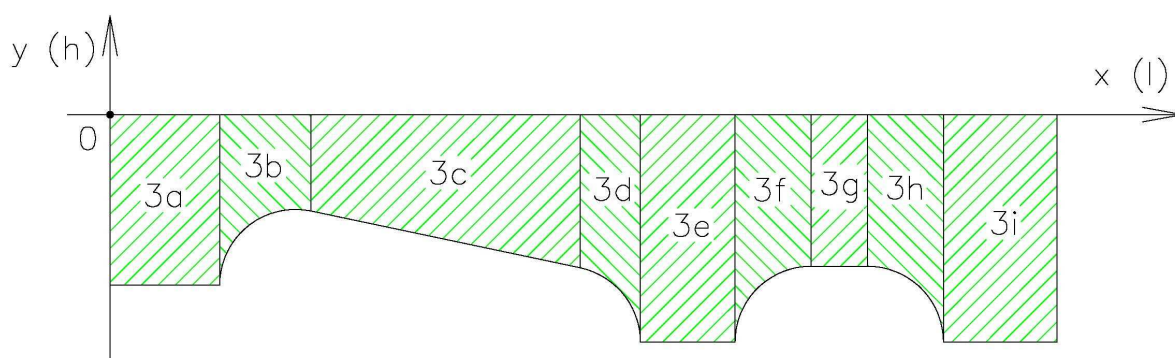
Tab. 3 Závislost hodnoty šířky b_2 na délce ramene l

l	$\langle 0; l_{21} \rangle$	$\langle l_{21}; l_{2a} \rangle$	$\langle l_{2a}; l_{2b} \rangle$
b_2	b_{2a}	b_{2b}	b_{2c}



Graf 2 Závislost hodnoty šířky b_2 na délce ramene l

5.2.3 Oblast 3



Obr. 18 Rozdělení oblasti 3 na podoblasti 3a až 3i.

Horní výška oblasti 3 (totožná s osou „x“)

$$h_{h3} = 0. \quad (25)$$

Výška zkosení horní hrany odlehčovacího otvoru 1

$$c_a = c_2 - c_1. \quad (26)$$

Délka podoblasti 3a a 5a

$$l_a = l_1 - r. \quad (27)$$



Délka podoblasti 3b a 5b

$$l_b = l_1 + \frac{c_a r}{\sqrt{l_2^2 + c_a^2}}. \quad (28)$$

Délka podoblasti 3c a 5c

$$l_c = l_b + l_2. \quad (29)$$

Délka podoblasti 3d a 5d

$$l_d = l_1 + l_2 + r. \quad (30)$$

Délka podoblasti 3e a 5e

$$l_e = l_1 + l_2 + l_3 - r. \quad (31)$$

Délka podoblasti 3f a 5f

$$l_f = l_e + r. \quad (32)$$

Délka podoblasti 3g a 5g

$$l_g = l_f + l_4. \quad (33)$$

Délka podoblasti 3h a 5h

$$l_h = l_g + r. \quad (34)$$

Délka podoblasti 3i a 5i

$$l_i = l_g + l_5. \quad (35)$$

Výška podoblasti 3a

$$h_{3a} = -c_1. \quad (36)$$

Výška podoblasti 3b

$$h_{3b} = -c_1 + \sqrt{r^2 - (l_1 - l)^2}. \quad (37)$$

Výška podoblasti 3c

$$h_{3c} = -\frac{c_1}{l_2} \left(l - l_1 - \frac{r c_a}{\sqrt{l_2^2 + c_a^2}} \right) - c_1 + \frac{r l_a}{\sqrt{l_2^2 + c_a^2}}. \quad (38)$$

Výška podoblasti 3d

$$h_{3d} = -c_2 + \sqrt{r^2 - (l_f - l)^2}. \quad (39)$$

Výška podoblasti 3e

$$h_{3e} = -c_2. \quad (40)$$

Výška podoblasti 3f

$$h_{3f} = -c_2 + \sqrt{r^2 - (l_f - l)^2}. \quad (41)$$

Výška podoblasti 3g

$$h_{3g} = -c_2 + r. \quad (42)$$

Výška podoblasti 3h

$$h_{3h} = -c_2 + \sqrt{r^2 - (l_g - l)^2}. \quad (43)$$

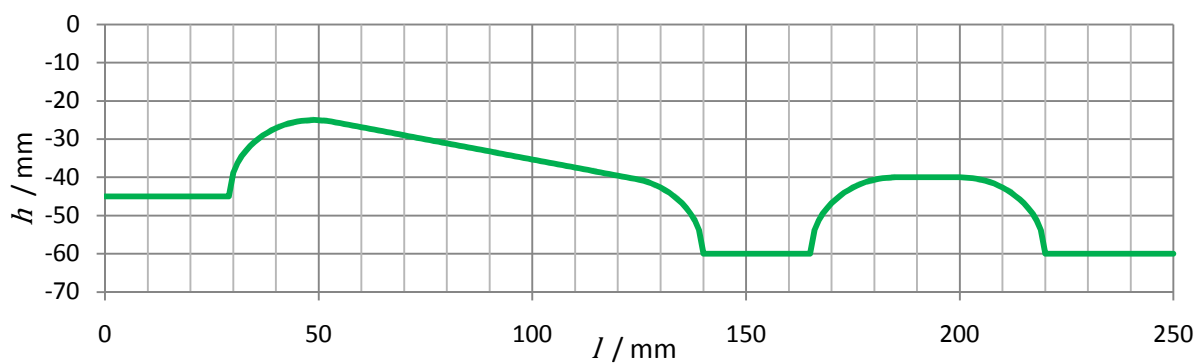
Výška podoblasti 3i

$$h_{3i} = -c_2. \quad (44)$$

Spodní výška oblasti 3

Tab. 4 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s3} na délce ramene l

l	$\langle 0; l_a \rangle$	$\langle l_a; l_b \rangle$	$\langle l_b; l_c \rangle$	$\langle l_c; l_d \rangle$	$\langle l_d; l_e \rangle$	$\langle l_e; l_f \rangle$	$\langle l_f; l_g \rangle$	$\langle l_g; l_h \rangle$	$\langle l_h; l_i \rangle$
h_{s3}	h_{3a}	h_{3b}	h_{3c}	h_{3d}	h_{3e}	h_{3f}	h_{3g}	h_{3h}	h_{3i}

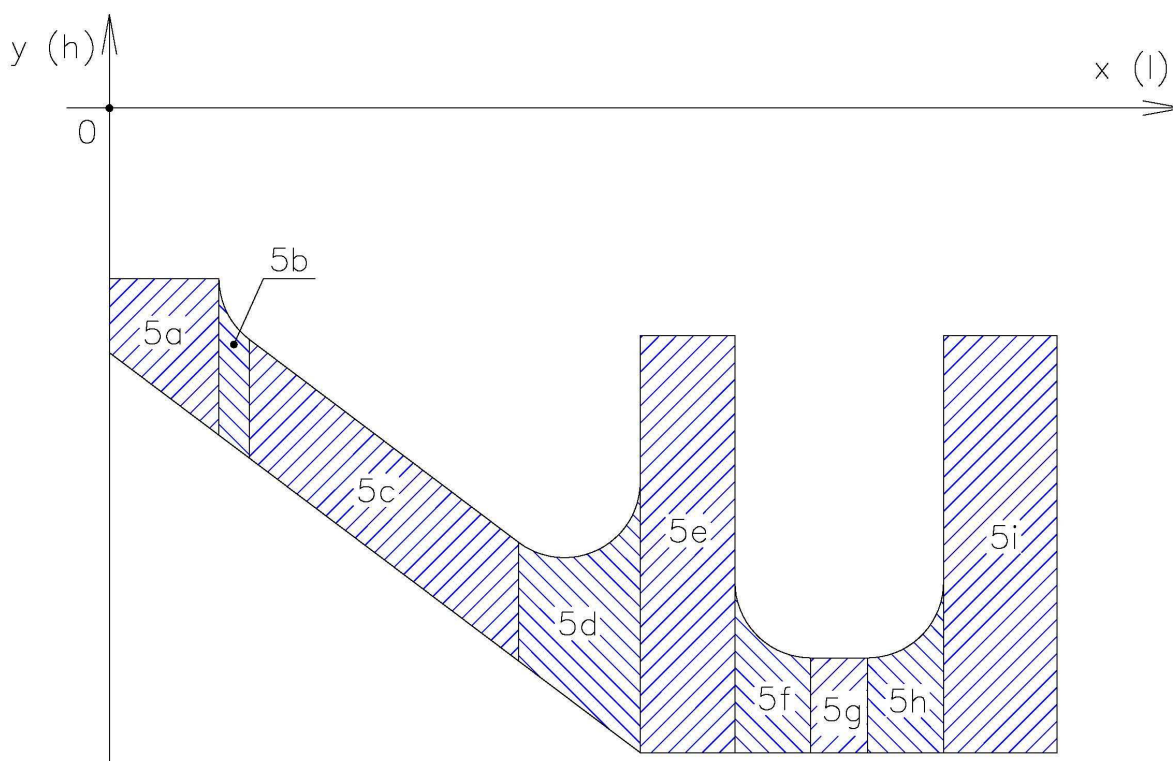


Graf 3 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s3} na délce ramene l

Šířka oblasti 3

$$b_3 = t. \quad (45)$$

5.2.4 Oblast 5



Obr. 19 Rozdělení oblasti 5 na podoblasti 5a až 5i

Délka podoblasti 5b

$$l_{5b} = l_1 - r \frac{c_4}{\sqrt{l_2^2 + c_4^2}}. \quad (46)$$

Délka podoblasti 5c

$$l_{5c} = l_{5b} + l_2. \quad (47)$$

Výška podoblasti 5a

$$h_{5a} = -c_1. \quad (48)$$

Výška podoblasti 5b

$$h_{5b} = -c_1 - \sqrt{r^2 - (l_1 - l)^2}. \quad (49)$$

Výška podoblasti 5c

$$h_{5c} = -c_1 - \frac{c_4(l - l_1)}{l_2} - \frac{r\sqrt{c_4^2 - l_2^2}}{l_2}. \quad (50)$$

Výška podoblasti 5d

$$h_{5d} = -c_1 - c_4 - \sqrt{r^2 - (l_1 + l_2 - l)^2}. \quad (51)$$

Výška podoblasti 5e

$$h_{5e} = -c_2. \quad (52)$$

Výška podoblasti 5f

$$h_{5f} = -c_2 - c_6 - \sqrt{r^2 - (l_f - l)^2}. \quad (53)$$

Výška podoblasti 5g

$$h_{5g} = -c_2 - c_6 - r. \quad (54)$$

Výška podoblasti 5h

$$h_{5h} = -c_2 - c_6 - \sqrt{r^2 - (l_g - l)^2}. \quad (55)$$

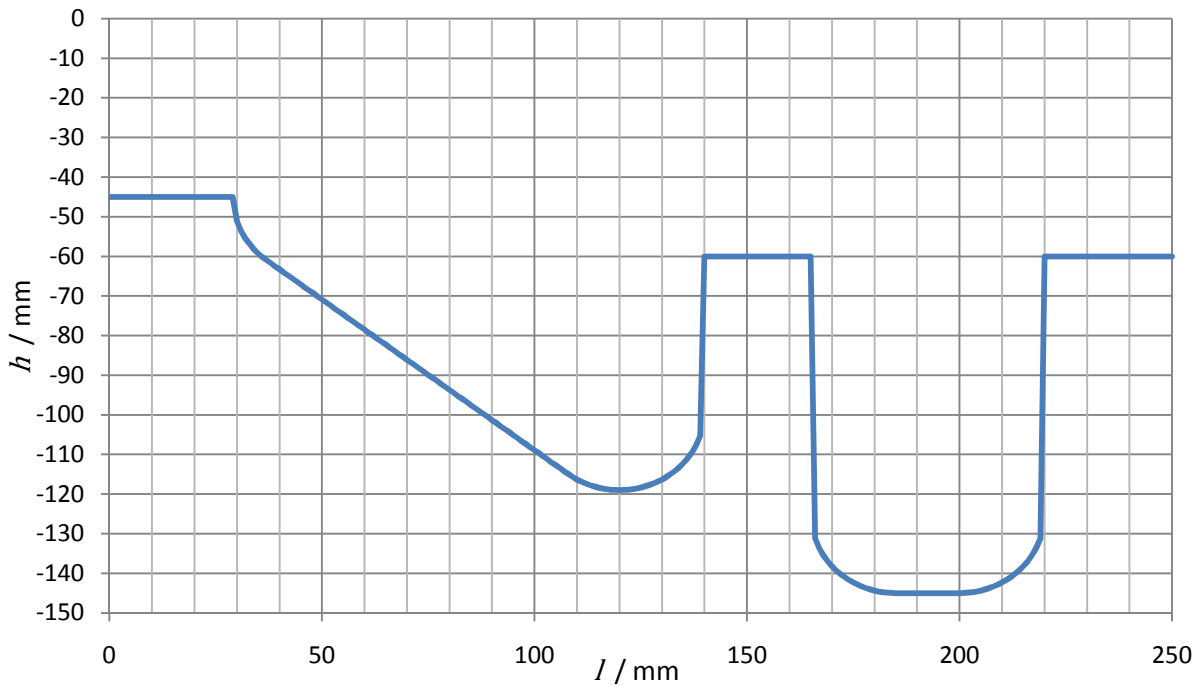
Výška podoblasti 5i

$$h_{5i} = -c_2. \quad (56)$$

Horní výška oblasti 5

Tab. 5 Závislost hodnoty horní výšky h_{h5} na délce ramene l

l	$\langle 0; l_a \rangle$	$\langle l_a; l_{5b} \rangle$	$\langle l_{5b}; l_{5c} \rangle$	$\langle l_{5c}; l_d \rangle$	$\langle l_d; l_e \rangle$	$\langle l_e; l_f \rangle$	$\langle l_f; l_g \rangle$	$\langle l_g; l_h \rangle$	$\langle l_h; l_i \rangle$
h_{h5}	h_{5a}	h_{5b}	h_{5c}	h_{5d}	h_{5e}	h_{5f}	h_{5g}	h_{5h}	h_{5i}



Graf 4 Závislost hodnoty horní výšky h_{h5} na délce ramene l

Výška podoblasti 5sa

$$h_{5sa} = c_3 - l \frac{c_3}{l_{51}} - e. \quad (57)$$

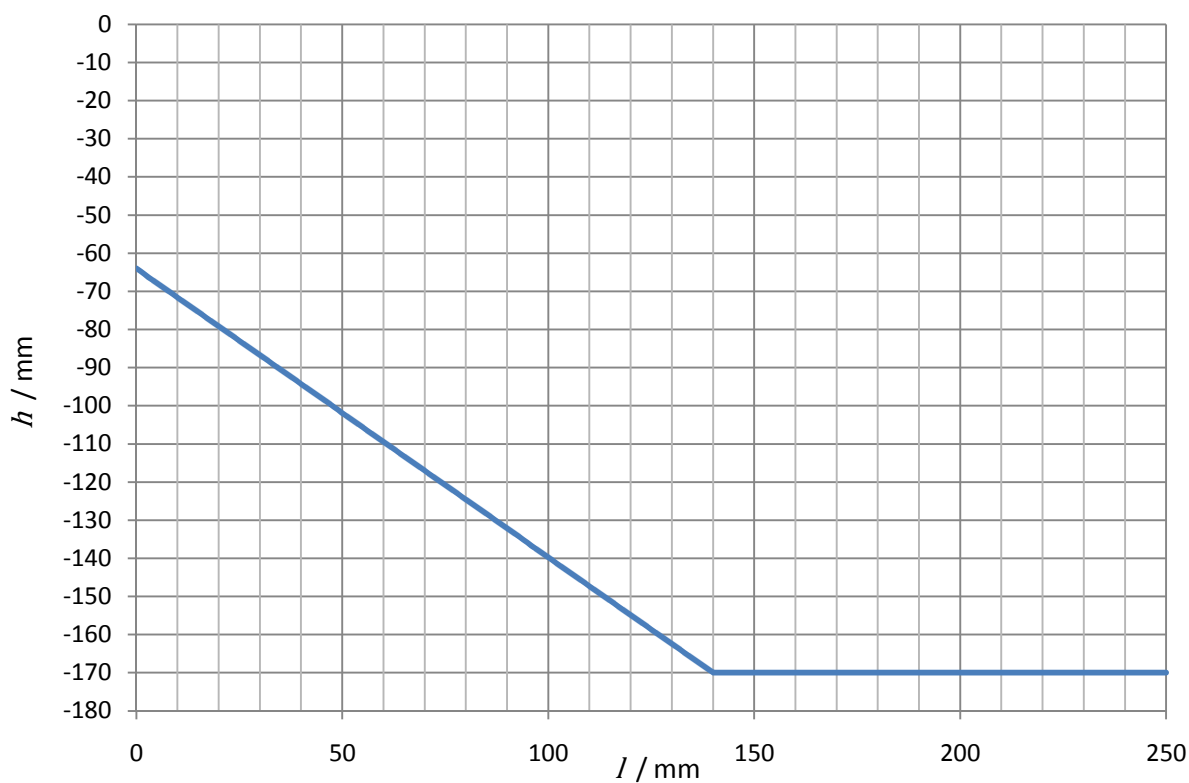
Výška podoblasti 5sb

$$h_{5sb} = -e. \quad (58)$$

Spodní výška oblasti 5

Tab. 6 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s5} na délce ramene l

l	$\langle 0; l_{51} \rangle$	$\langle l_{51}; v \rangle$
h_{s5}	h_{5sa}	h_{5sb}



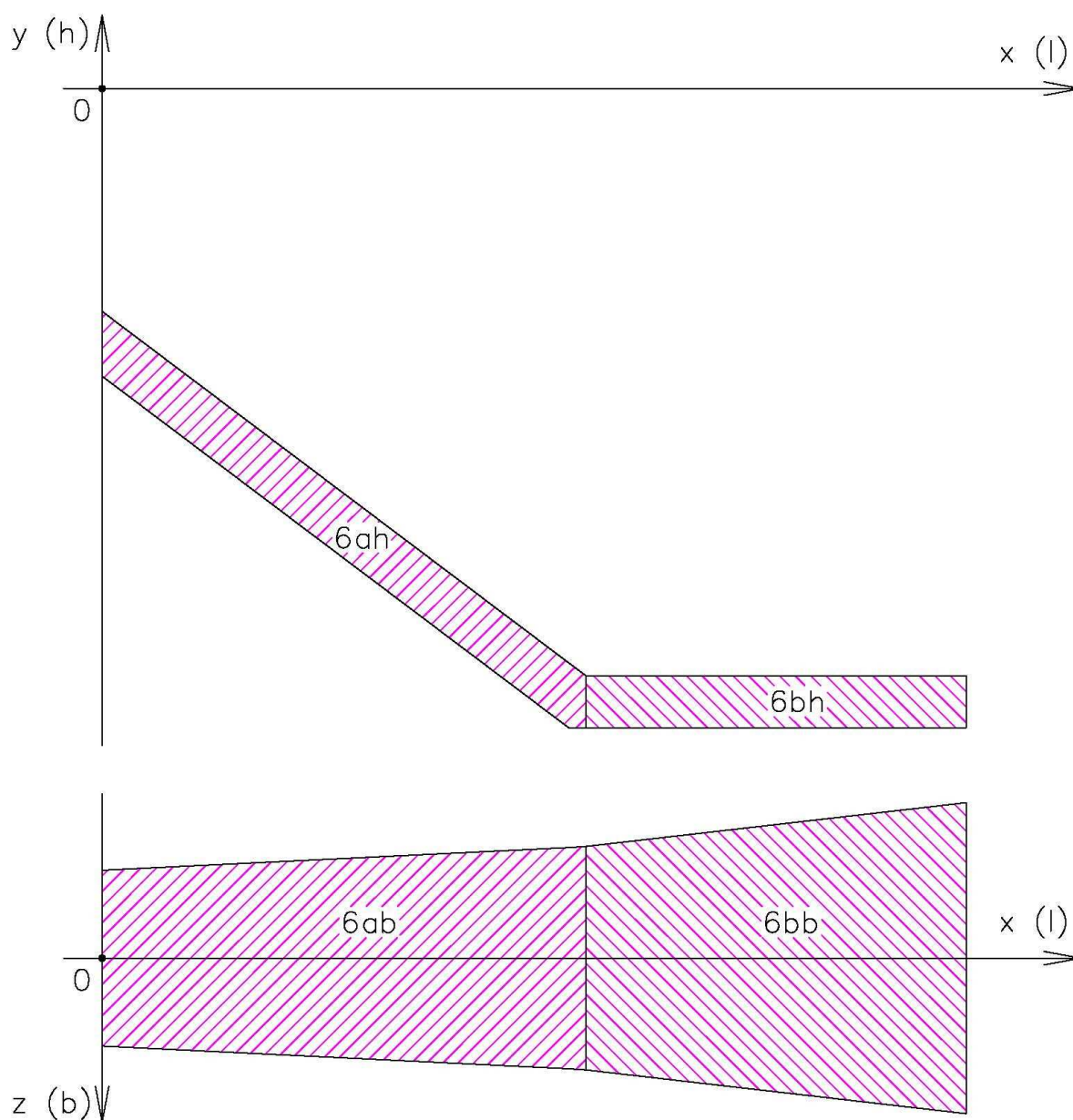
Graf 5 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s5} na délce ramene l

Šířka oblasti 5

$$b_5 = t.$$

(59)

5.2.5 Oblast 6



Obr. 20 Rozdělení oblasti 6 na podoblasti 6ah, 6bh, 6ab, 6bb

Délka podoblasti 6ah

$$l_{6ah} = l_{51} . \quad (60)$$

Délka podoblasti 6bh

$$l_{6bh} = v . \quad (61)$$

Délka podoblasti 6ab

$$l_{6ab} = l_{61} . \quad (62)$$

Délka podoblasti 6bb

$$l_{6bb} = l_{62} . \quad (62)$$

Horní výška oblasti 6

$$h_{h6} = h_{s5} . \quad (64)$$

Výška podoblasti 6a

$$h_{6a} = \frac{t \sqrt{l_{51}^2 - c_3^2}}{l_{51}} . \quad (65)$$

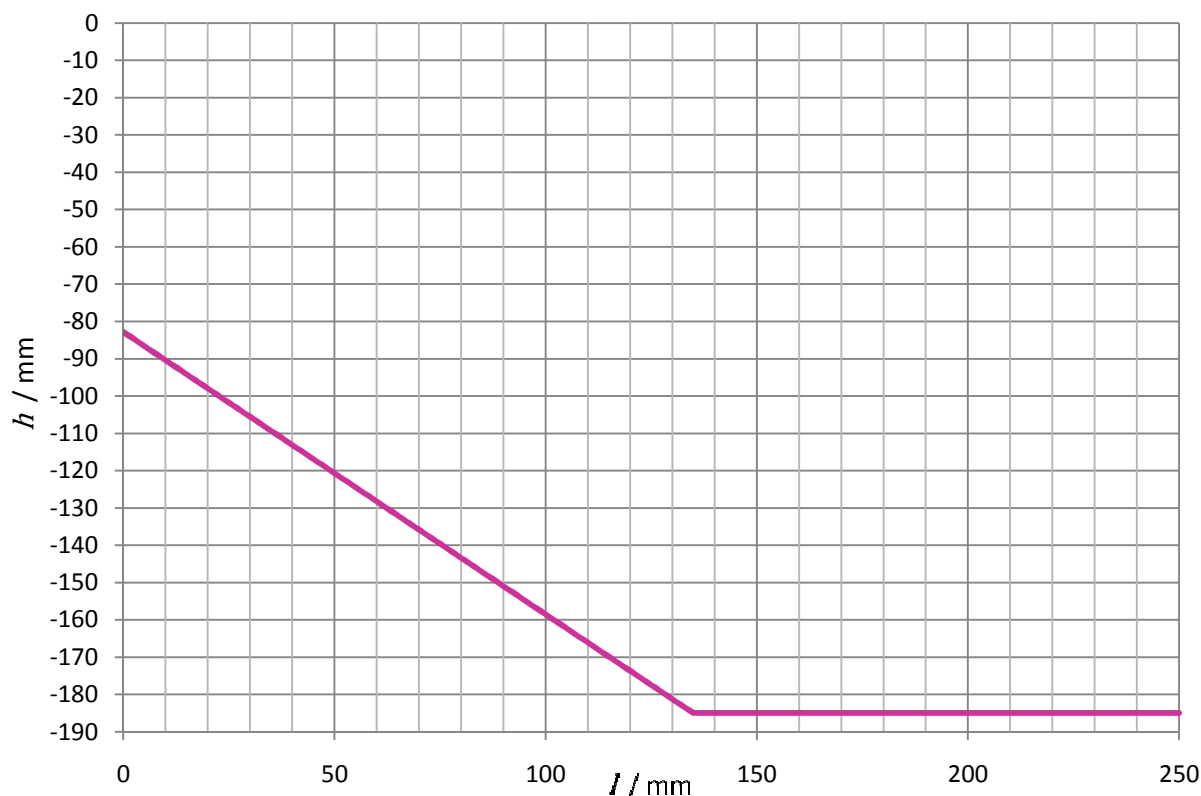
Výška podoblasti 6b

$$h_{6b} = t . \quad (66)$$

Spodní výška oblasti 6

Tab. 7 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s6} na délce ramene l

l	$\langle 0; l_{6ah} \rangle$	$\langle l_{6ah}; l_{6bh} \rangle$
h_{s6}	h_{6a}	h_{6b}



Graf 6 Závislost hodnoty spodní výšky h_{s6} na délce ramene l

Šířka podoblasti 6a

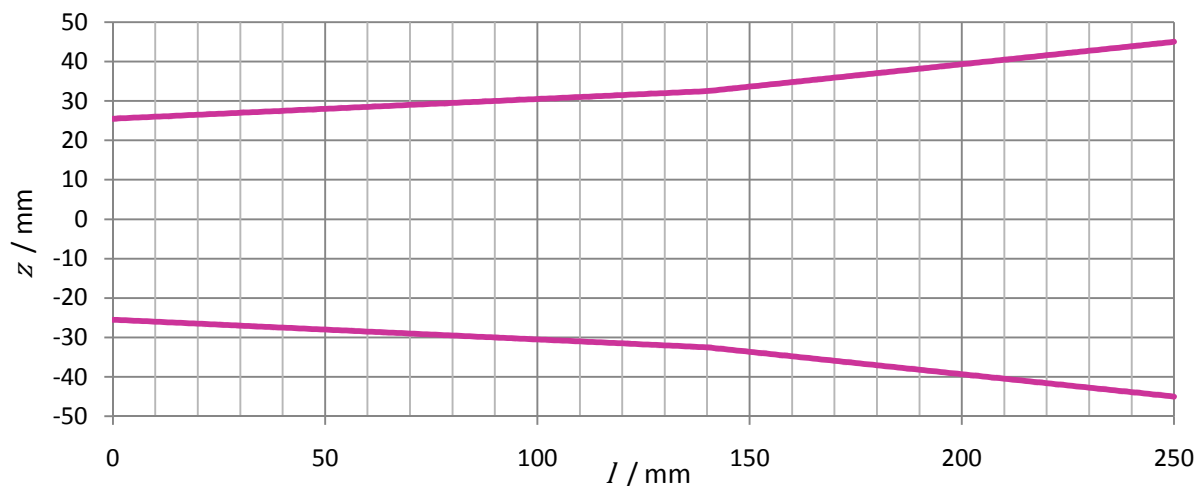
$$b_{6a} = b_{61} + l \left(\frac{b_{62} - b_{61}}{l_{61}} \right) . \quad (67)$$

Šířka podoblasti 6b

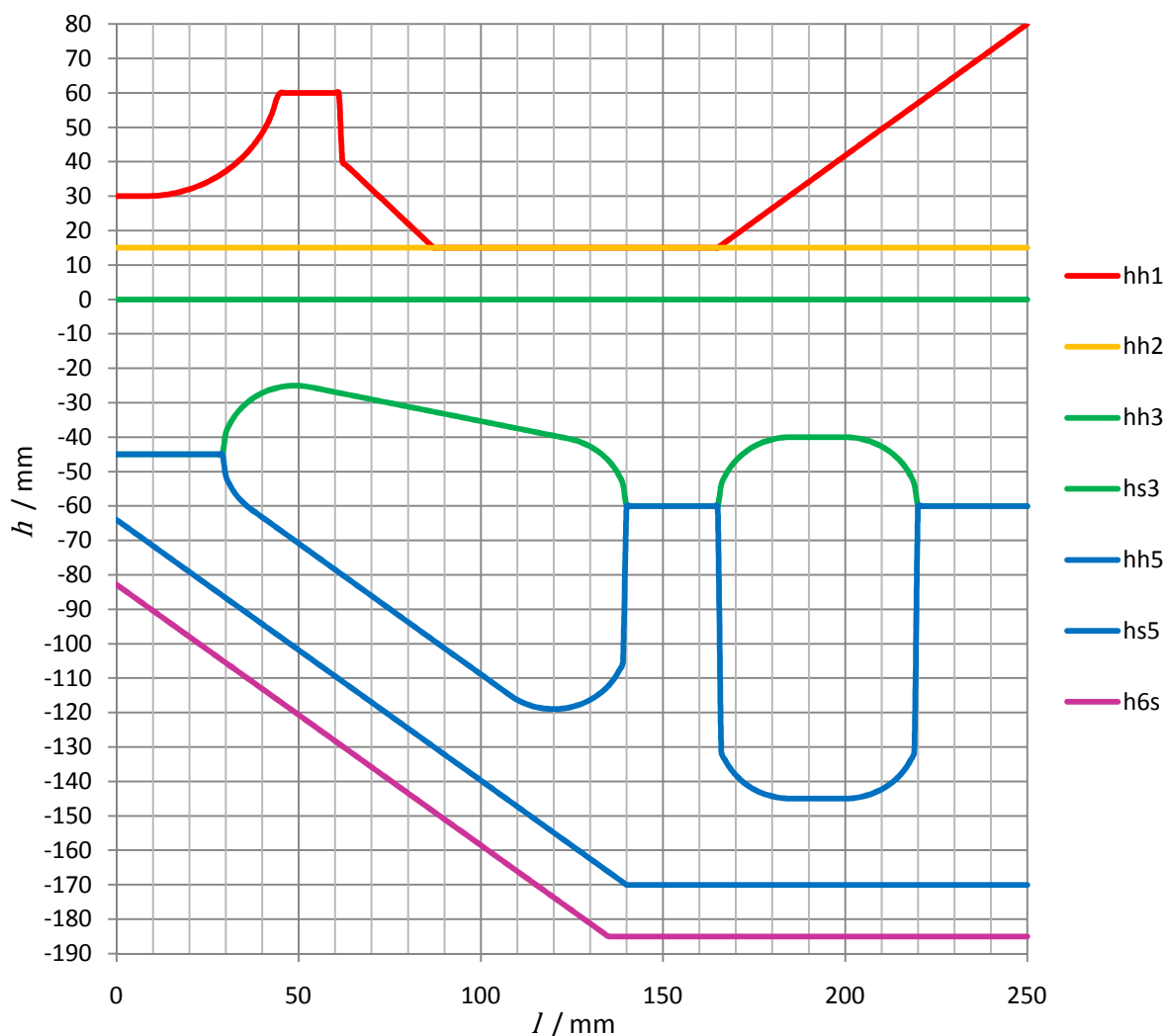
$$b_{6b} = b_{62} + (l - b_{61}) \left(\frac{b_{63} - b_{62}}{l_{62}} \right) . \quad (68)$$

Tab. 8 Závislost hodnoty šířky b_6 na délce ramene l

l	$\langle 0; l_{6ab} \rangle$	$\langle l_{6ab}; l_{6bb} \rangle$
b_6	b_{6a}	b_{6b}



Graf 7 Závislost hodnoty šířky b_6 na délce ramene l



Graf 8 Závislosti hodnoty všech výšek h na délce ramene l

5.3 Těžiště

Pomocné rovnice

$$b_1 = (z_2 - z_1) \quad (69)$$

$$b_2 = (z_3 - z_4) \quad (70)$$

$$b_3 = (z_2 - z_1) \quad (71)$$

$$b_5 = (z_2 - z_1) \quad (72)$$

$$b_6 = (z_5 - z_6) . \quad (73)$$

Statický moment plochy průřezu oblasti 1

$$\begin{aligned} M_{s1} &= \int_{S_1} h dS = \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} h dh = \int_{z_1}^{z_2} \left[\frac{h^2}{2} \right]_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} dz = \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{h_{h1}^2(z)}{2} - \frac{h_{s1}^2(z)}{2} \right) dz = \\ &= \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{h_{h1}^2}{2} - \frac{h_{s1}^2}{2} \right) dz = \left[\frac{h_{h1}^2}{2} z - \frac{h_{s1}^2}{2} z \right]_{z_1}^{z_2} = \left(\frac{h_{h1}^2}{2} - \frac{h_{s1}^2}{2} \right) (z_2 - z_1) \end{aligned}$$

$$M_{s1} = \int_{S_1} h dS = \frac{1}{2} (h_{h1}^2 - h_{s1}^2) b_1 . \quad (74)$$

Statický moment plochy průřezu oblasti 2

$$M_{s2} = \int_{S_2} h dS = \frac{1}{2} (h_{h2}^2 - h_{s2}^2) b_2 . \quad (75)$$

Statický moment plochy průřezu oblasti 3

$$M_{s3} = \int_{S_3} h dS = \frac{1}{2} (h_{h3}^2 - h_{s3}^2) b_3 . \quad (76)$$

Statický moment plochy průřezu oblasti 5

$$M_{s5} = \int_{S_5} h dS = \frac{1}{2} (h_{h5}^2 - h_{s5}^2) b_5 . \quad (77)$$

Statický moment plochy průřezu oblasti 6

$$M_{s6} = \int_{S_6} h dS = \frac{1}{2} (h_{h6}^2 - h_{s6}^2) b_6 . \quad (78)$$

Statický moment plochy průřezu

$$\begin{aligned} M_s &= M_1 + M_2 + M_3 + M_5 + M_6 \\ M_s &= b_1 (h_{h1}^2 - h_{s1}^2) + b_2 (h_{h2}^2 - h_{s2}^2) + b_3 (h_{h3}^2 - h_{s3}^2) + b_5 (h_{h5}^2 - h_{s5}^2) + b_6 (h_{h6}^2 - h_{s6}^2) . \end{aligned} \quad (79)$$

Plocha průřezu oblasti 1

$$S_1 = \int_{S_1} dS = \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} dh = \int_{z_1}^{z_2} [h]_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} dz = \int_{z_1}^{z_2} (h_{h1}(z) - h_{s1}(z)) dz =$$

$$= \int_{z_1}^{z_2} (h_{h1} - h_{s1}) dz = [h_{h1} \cdot z - h_{s1} \cdot z]_{z_1}^{z_2} = (h_{h1} - h_{s1})(z_2 - z_1)$$

$$S_1 = \int_{S_1} dS = (h_{h1} - h_{s1})b_1. \quad (80)$$

Plocha průřezu oblasti 2

$$S_2 = \int_{S_2} dS = (h_{h2} - h_{s2})b_2. \quad (81)$$

Plocha průřezu oblasti 3

$$S_3 = \int_{S_3} dS = (h_{h3} - h_{s3})b_3. \quad (82)$$

Plocha průřezu oblasti 5

$$S_5 = \int_{S_5} dS = (h_{h5} - h_{s5})b_5. \quad (83)$$

Plocha průřezu oblasti 6

$$S_6 = \int_{S_6} dS = (h_{h6} - h_{s6})b_6. \quad (84)$$

Plocha průřezu

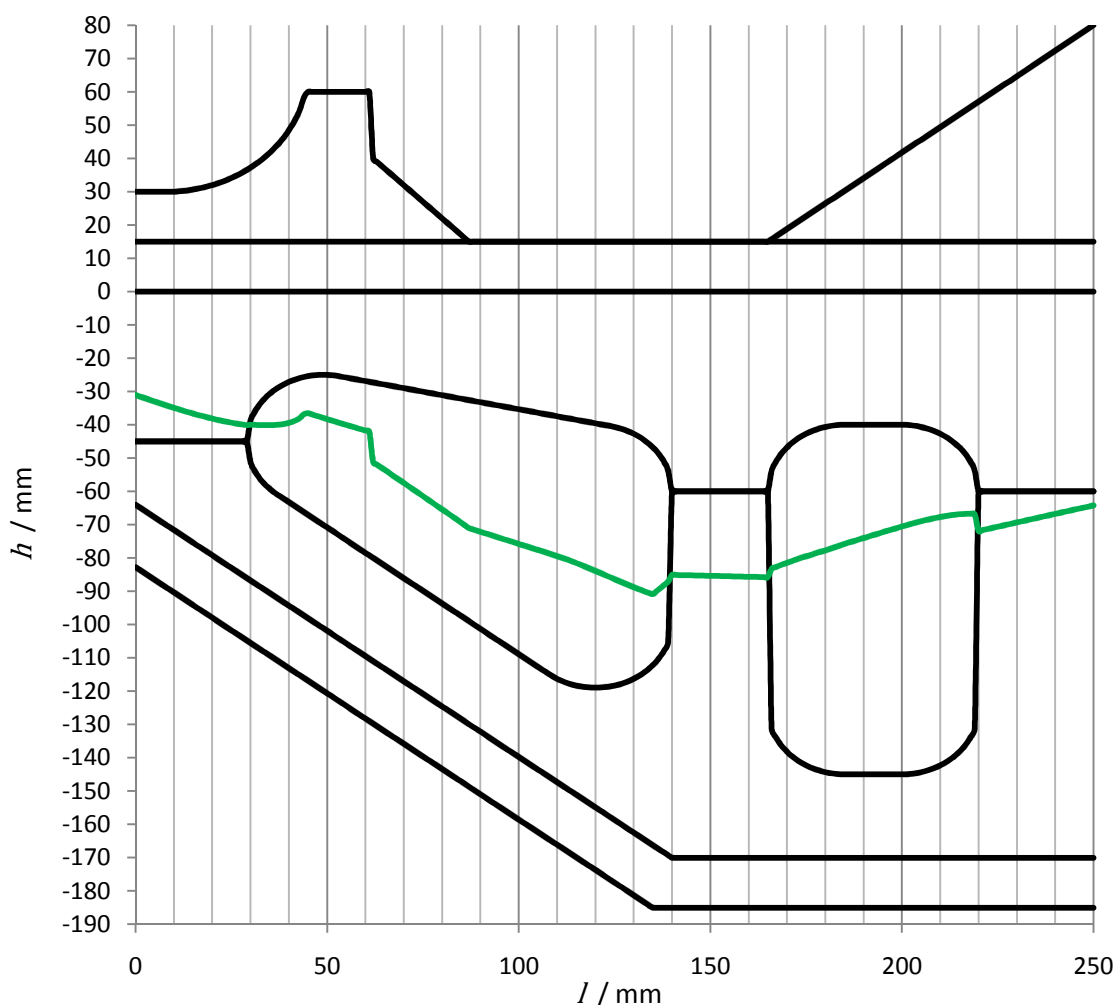
$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_5 + S_6$$

$$S = b_1(h_{h1} - h_{s1}) + b_2(h_{h2} - h_{s2}) + b_3(h_{h3} - h_{s3}) + b_5(h_{h5} - h_{s5}) + b_6(h_{h6} - h_{s6}). \quad (85)$$

Výška těžiště plochy průřezu

$$h_T = \frac{M_S}{S} = \frac{\int_S h dS}{\int_S dS}$$

$$h_T = \frac{b_1(h_{h1}^2 - h_{s1}^2) + b_2(h_{h2}^2 - h_{s2}^2) + b_3(h_{h3}^2 - h_{s3}^2) + b_5(h_{h5}^2 - h_{s5}^2) + b_6(h_{h6}^2 - h_{s6}^2)}{2[b_1(h_{h1} - h_{s1}) + b_2(h_{h2} - h_{s2}) + b_3(h_{h3} - h_{s3}) + b_5(h_{h5} - h_{s5}) + b_6(h_{h6} - h_{s6})]} \quad (86)$$



Graf 9 Závislost hodnoty výšek těžiště ploch průřezů h_T na délce ramene l

5.4 Kvadratický moment háku

Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 1

$$\begin{aligned}
 I_{z1} &= \int_{S_1} (h - h_T)^2 dS = \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} (h - h_T)^2 dh = \int_{z_1}^{z_2} \left[\frac{(h - h_T)^3}{3} \right]_{h_{s1}(z)}^{h_{h1}(z)} dz = \\
 &= \int_{z_1}^{z_2} \left[\frac{(h_{h1}(z) - h_T)^3}{3} - \frac{(h_{s1}(z) - h_T)^3}{3} \right] dz = \int_{z_1}^{z_2} \left[\frac{(h_{h1} - h_T)^3}{3} - \frac{(h_{s1} - h_T)^3}{3} \right] dz = \\
 &= \left[\frac{(h_{h1} - h_T)^3}{3} z - \frac{(h_{s1} - h_T)^3}{3} z \right]_{z_1}^{z_2} = \left[\frac{(h_{h1} - h_T)^3}{3} - \frac{(h_{s1} - h_T)^3}{3} \right] (z_2 - z_1) \\
 I_{z1} &= \int_{S_1} (h - h_T)^2 dS = \frac{1}{3} [(h_{h1} - h_T)^3 - (h_{s1} - h_T)^3] b_1. \quad (87)
 \end{aligned}$$



Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 2

$$I_{z2} = \int_{S_2} (h - h_T)^2 dS = \frac{1}{3} [(h_{h2} - h_T)^3 - (h_{s2} - h_T)^3] b_2. \quad (88)$$

Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 3

$$I_{z3} = \int_{S_3} (h - h_T)^2 dS = \frac{1}{3} [(h_{h3} - h_T)^3 - (h_{s3} - h_T)^3] b_3. \quad (89)$$

Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 5

$$I_{z5} = \int_{S_5} (h - h_T)^2 dS = \frac{1}{3} [(h_{h5} - h_T)^3 - (h_{s5} - h_T)^3] b_5. \quad (90)$$

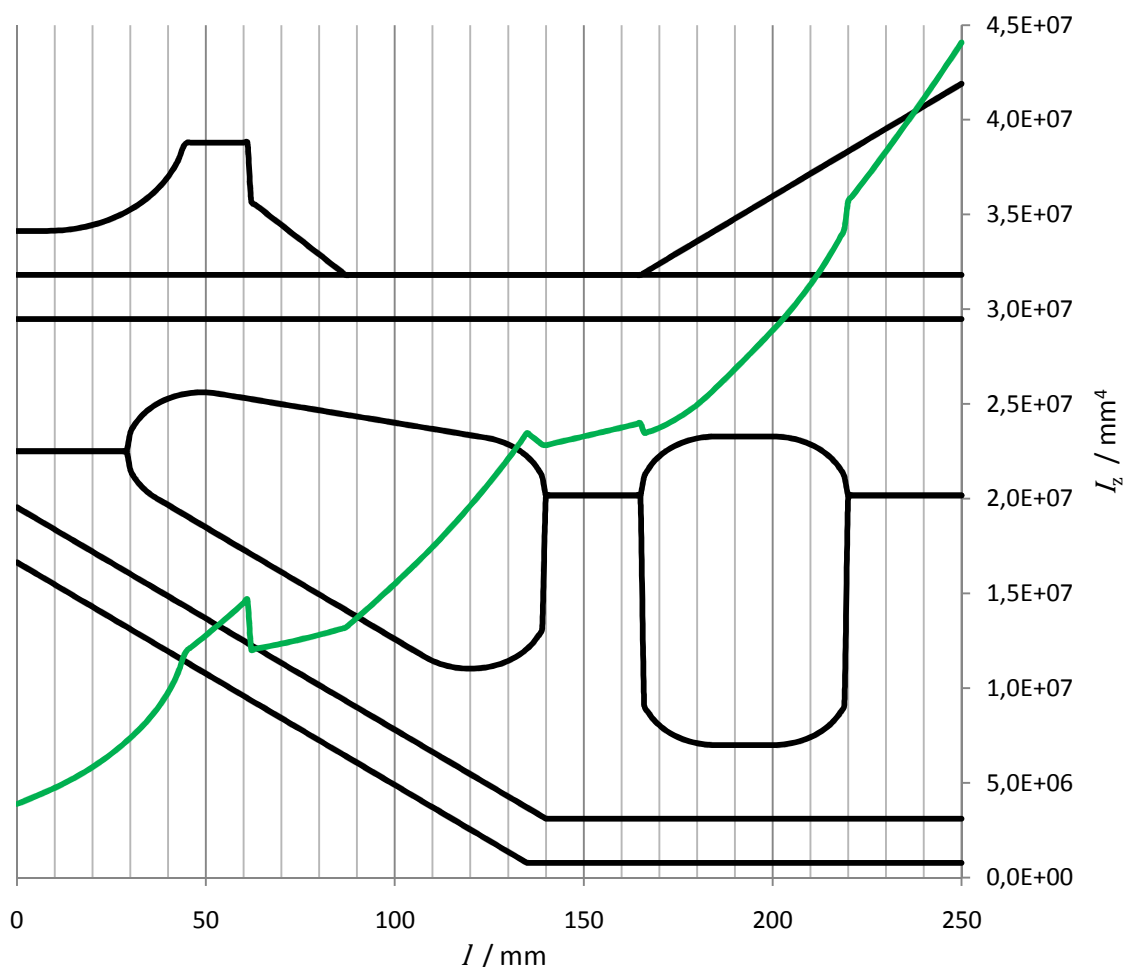
Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 6

$$I_{z6} = \int_{S_6} (h - h_T)^2 dS = \frac{1}{3} [(h_{h6} - h_T)^3 - (h_{s6} - h_T)^3] b_6. \quad (91)$$

Kvadratický moment plochy průřezu

$$I_z = I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} + I_{z5} + I_{z6}$$

$$\begin{aligned} I_z = & \frac{1}{3} \{ b_1 [(h_{h1} - y_T)^3 - (h_{s1} - y_T)^3] + b_2 [(h_{h2} - y_T)^3 - (h_{s2} - y_T)^3] + \\ & + b_3 [(h_{h3} - y_T)^3 - (h_{s3} - y_T)^3] + b_5 [(h_{h5} - y_T)^3 - (h_{s5} - y_T)^3] + \\ & + b_6 [(h_{h6} - y_T)^3 - (h_{s6} - y_T)^3] \}. \end{aligned} \quad (92)$$



Graf 10 Závislost hodnoty kvadratického momentu plochy I_z na délce ramene l

5.5 Ohybový moment háku, posouvající síla

Pro další výpočty háku je nutné stanovit zatěžující sílu. Zatěžující síla v tomto případě není zcela jednoznačná, jak vyplývá z dalšího rozboru v kapitole 6 Zatěžující síla. Proto je zaveden zjednodušující předpoklad $F = 5000 \text{ N}$, který umožní pokračovat ve výpočtu.

$$F = 5000 \text{ N}$$

Ohybový moment

$$M_o = F \cdot l.$$

(93)

Pro zjištění maximálního redukovaného napětí je nutné jak ohybové tak smykové napětí vyjádřit funkčně v závislosti na výšce analyzovaného vlákna v ploše průřezu.

Při určování smykového napětí, je nutné znát statický moment celé plochy nad určeným místem. Tento moment se určuje vzhledem k těžišti celkové plochy průřezu.

Statický moment plochy nad spodní hranicí oblasti 1 vůči těžišti

$$\begin{aligned}
 M_{sh1} &= \int_{S_1} (h - h_T) dS = \int_{h_{s1}}^{h_{h1}} dh \int_{z_1}^{z_2} (h - h_T) dz = \int_{h_{s1}}^{h_{h1}} [(h - h_T) z]_{z_1}^{z_2} dh = \\
 &= \int_{h_{s1}}^{h_{h1}} (h - h_T)(z_2 - z_1) dh = \frac{(z_2 - z_1)}{2} [(h - h_T)^2]_{h_{s1}}^{h_{h1}} = \\
 &= \frac{(z_2 - z_1)}{2} [(h_{h1} - h_T)^2 - (h_{s1} - h_T)^2] = \\
 &= \frac{(z_2 - z_1)}{2} (h_{h1} - h_T - h_{s1} + h_T)(h_{s1} - h_T + h_{h1} - h_T) = \\
 &= \frac{(z_2 - z_1)}{2} (h_{h1} - h_{s1})(h_{s1} + h_{h1} - 2h_T)
 \end{aligned}$$

$$M_{sh1} = \int_{S_1} (h - h_T) dS = \frac{b_1}{2} (h_{h1} - h_{s1})(h_{h1} + h_{s1} - 2h_T). \quad (94)$$

Statický moment plochy nad spodní hranicí oblasti 2 vůči těžišti

$$M_{sh2} = \int_{S_2} (h - h_T) dS = \frac{b_2}{2} (h_{h2} - h_{s2})(h_{h2} + h_{s2} - 2h_T) + M_{sh1}. \quad (95)$$

Statický moment plochy nad spodní hranicí oblasti 3 vůči těžišti

$$M_{sh3} = \int_{S_3} (h - h_T) dS = \frac{b_3}{2} (h_{h3} - h_{s3})(h_{h3} + h_{s3} - 2h_T) + M_{sh2}. \quad (95)$$

Statický moment plochy nad spodní hranicí oblasti 5 vůči těžišti

$$M_{sh5} = \int_{S_5} (h - h_T) dS = \frac{b_5}{2} (h_{h5} - h_{s5})(h_{h5} + h_{s5} - 2h_T) + M_{sh3}. \quad (96)$$

Statický moment plochy nad spodní hranicí oblasti 6 vůči těžišti

$$M_{sh6} = \int_{S_6} (h - h_T) dS = \frac{b_6}{2} (h_{h6} - h_{s6})(h_{h6} + h_{s6} - 2h_T) + M_{sh5}. \quad (97)$$

Pomocná oblast 1 pro $h \in \langle h_{h1}; h_{s1} \rangle$

$$s_{1(h)} \in \langle h_{h1}; h \rangle. \quad (98)$$

Pomocná oblast 2 pro $h \in \langle h_{h2}; h_{s2} \rangle$

$$s_{2(h)} \in \langle h_{h2}; h \rangle \cup \langle h_{h1}; h_{s1} \rangle. \quad (99)$$

Pomocná oblast 3 pro $h \in \langle h_{h3}; h_{s3} \rangle$

$$s_{3(h)} \in \langle h_{h3}; h \rangle \cup \langle h_{h1}; h_{s1} \rangle \cup \langle h_{h2}; h_{s2} \rangle. \quad (100)$$

Pomocná oblast 3 pro $h \in \langle h_{h5}; h_{s5} \rangle$

$$s_{5(h)} \in \langle h_{h5}; h \rangle \cup \langle h_{h1}; h_{s1} \rangle \cup \langle h_{h2}; h_{s2} \rangle \cup \langle h_{h3}; h_{s3} \rangle. \quad (101)$$

Pomocná oblast 3 pro $h \in (h_{h6}; h_{s6})$

$$s_{6(h)} \in \langle h_{h6}; h \rangle \cup \langle h_{h1}; h_{s1} \rangle \cup \langle h_{h2}; h_{s2} \rangle \cup \langle h_{h3}; h_{s3} \rangle \cup \langle h_{h5}; h_{s5} \rangle. \quad (102)$$

Místo ve kterém se zjišťuje tečné napětí, je nazváno: „analyzovaná hranice“.

Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 1

$$M_{s(h)1} = \int_{s_{1(h)}} (h - h_T) dS = \frac{b_1}{2} (h_{h1} - h)(h_h + h - 2h_T). \quad (103)$$

Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 2

$$M_{s(h)2} = \int_{s_{2(h)}} (h - h_T) dS = \frac{b_2}{2} (h_{h2} - h)(h_{h2} + h - 2h_T) + M_{sh1}. \quad (104)$$

Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 3

$$M_{s(h)3} = \int_{s_{3(h)}} (h - h_T) dS = \frac{b_3}{2} (h_{h3} - h)(h_{h3} + h - 2h_T) + M_{sh2}. \quad (105)$$

Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 5

$$M_{s(h)5} = \int_{s_{5(h)}} (h - h_T) dS = \frac{b_5}{2} (h_{h5} - h)(h_{h5} + h - 2h_T) + M_{sh3}. \quad (106)$$

Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 6

$$M_{s(h)6} = \int_{s_{6(h)}} (h - h_T) dS = \frac{b_6}{2} (h_{h6} - h)(h_{h6} + h - 2h_T) + M_{sh6}. \quad (107)$$

Celkový moment oblasti nad analyzovanou hranicí

Tab. 9 Závislost hodnoty statického momentu $M_{s(h)}$ na výšce analyzované roviny h

h	$\langle h_{h1}; h_{s1} \rangle$	$\langle h_{h2}; h_{s2} \rangle$	$\langle h_{h3}; h_{s3} \rangle$	$\langle h_{h5}; h_{s5} \rangle$	$\langle h_{h6}; h_{s6} \rangle$
$M_{s(h)}$	$M_{s(h)1}$	$M_{s(h)2}$	$M_{s(h)3}$	$M_{s(h)5}$	$M_{s(h)6}$

Smykové napětí

$$\tau = \frac{F M_{s(h)}}{I_z b}. \quad (108)$$

Ohybové napětí

$$\sigma_o = \frac{M_o \cdot h}{I_z}. \quad (109)$$

5.6 Redukované napětí

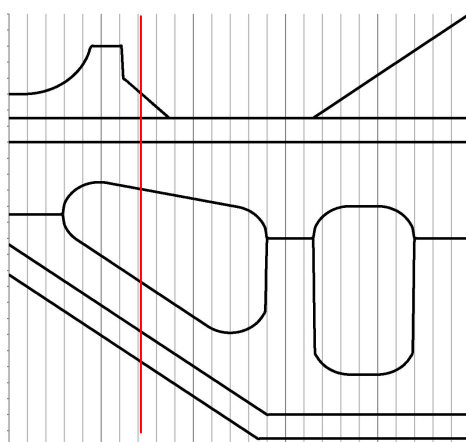
Redukované napětí dle teorie maximálních smykových napětí

$$\sigma_{red1} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4\tau^2}. \quad (110)$$

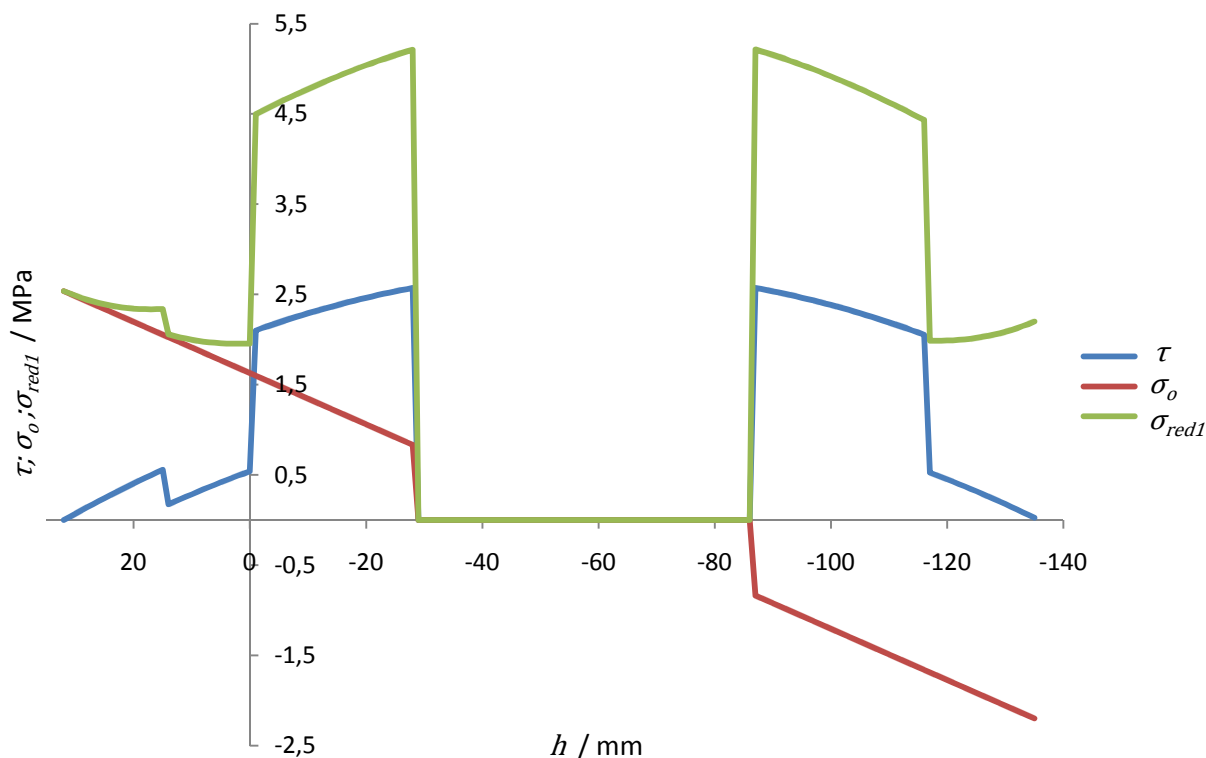
Redukované napětí dle teorie HMM

$$\sigma_{red2} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau^2}. \quad (111)$$

V MKŘ lze zobrazit pro libovolnou řeznou rovinu smykové, ohybové i redukované napětí. je zvoleno několik typických průřezů, kde jsou tyto hodnoty zobrazeny v grafu v závislosti na výšce h .

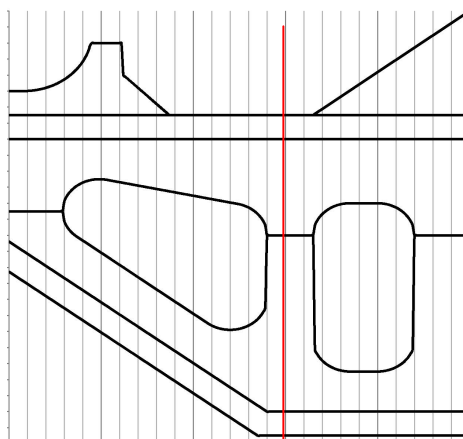


Obr. 21 Poloha roviny řezu 70

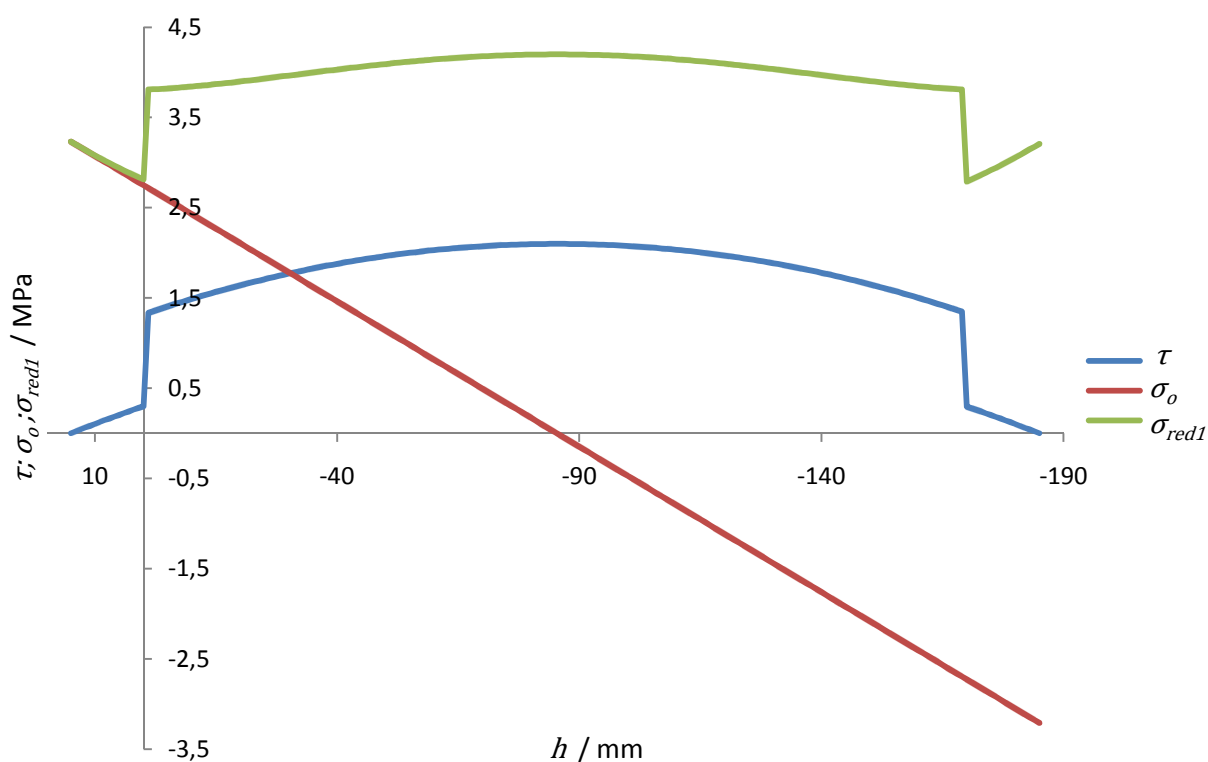


Graf 11 Závislosti napětí τ ; σ_0 ; σ_{red1} na výšce h pro řez 70

Graf 11 znázorňuje hodnoty v řezu, v bodě $l = 70 \text{ mm}$, je patrné, že na nejvyšší hodnoty výsledného redukovaného napětí má rozhodující vliv smykové napětí. Díky otvoru 1 se objeví místo, kde je napětí nulové.

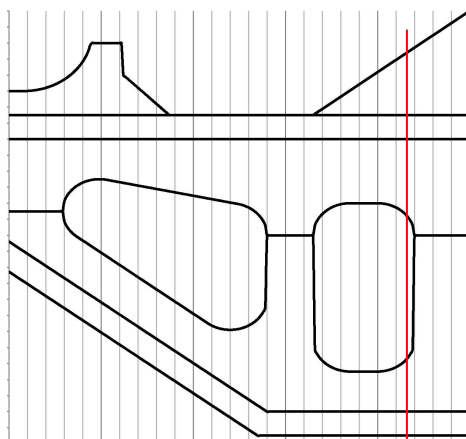


Obr. 22 Poloha roviny řezu 150

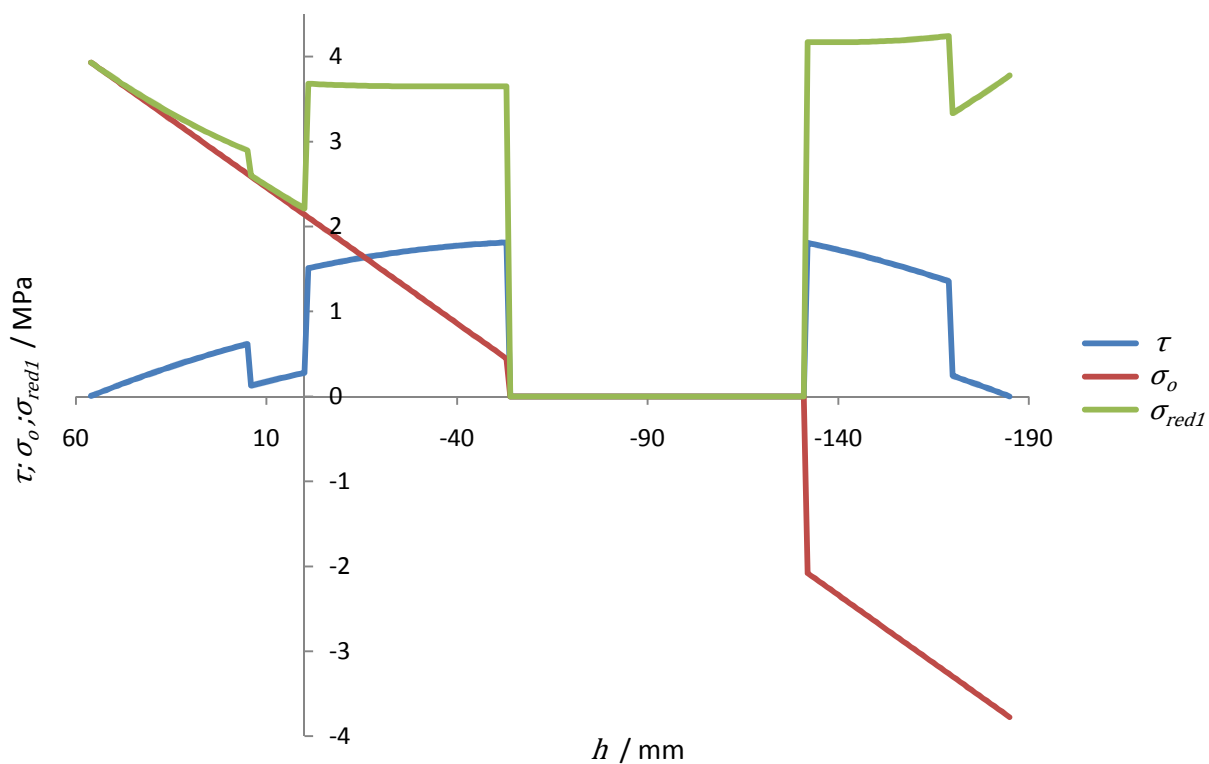


Graf 12 Závislostí napětí τ ; σ_0 ; σ_{red1} na výšce h pro řez 150

Graf 12 znázorňuje hodnoty pro řez $l = 150 \text{ mm}$. Rozhodující vliv má stále Smykové napětí.

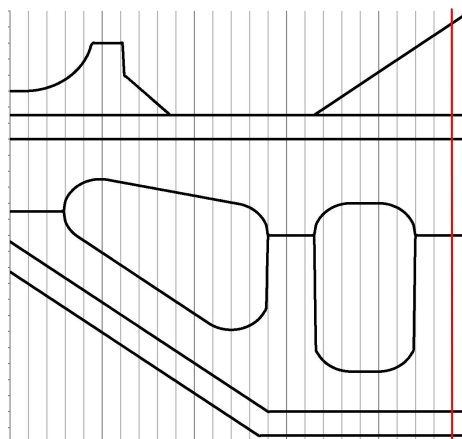


Obr. 23 Poloha roviny řezu 219

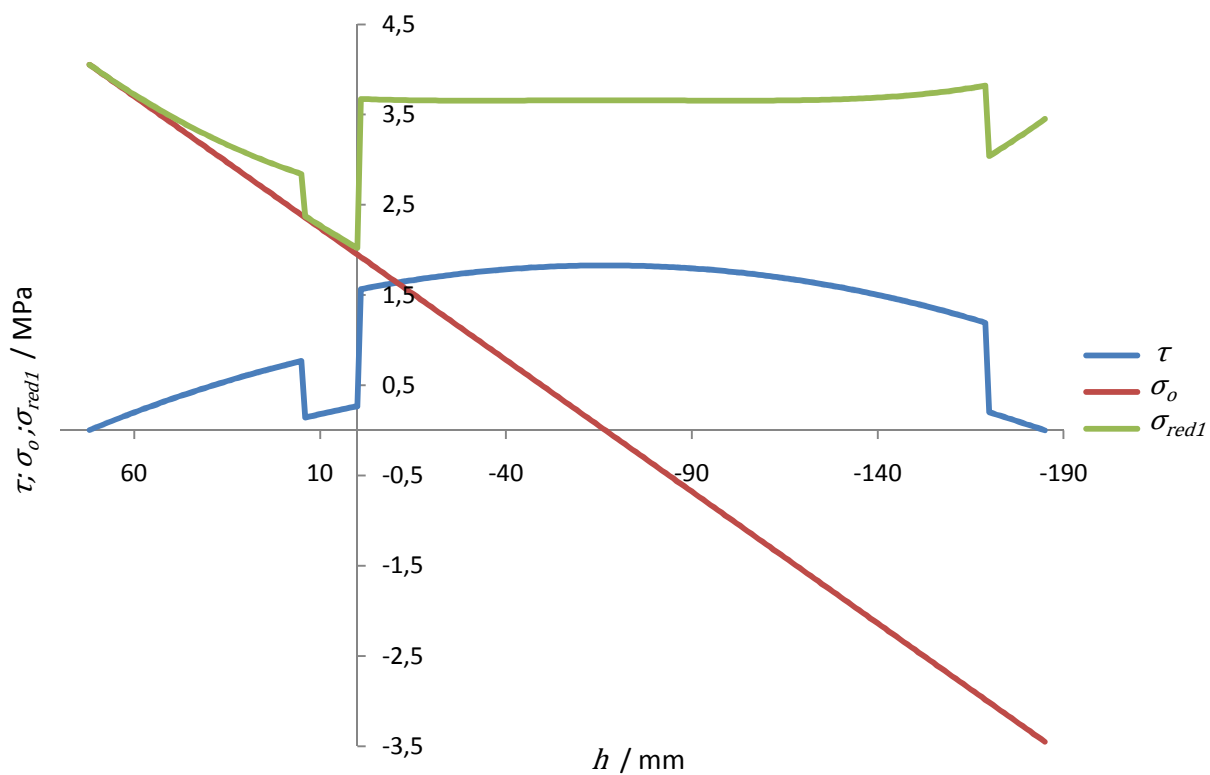


Graf 13 Závislosti napětí τ ; σ_0 ; σ_{red1} na výšce h pro řez 219

Graf 13 pro řez $l = 219 \text{ mm}$, začíná převládat vliv ohybového napětí.



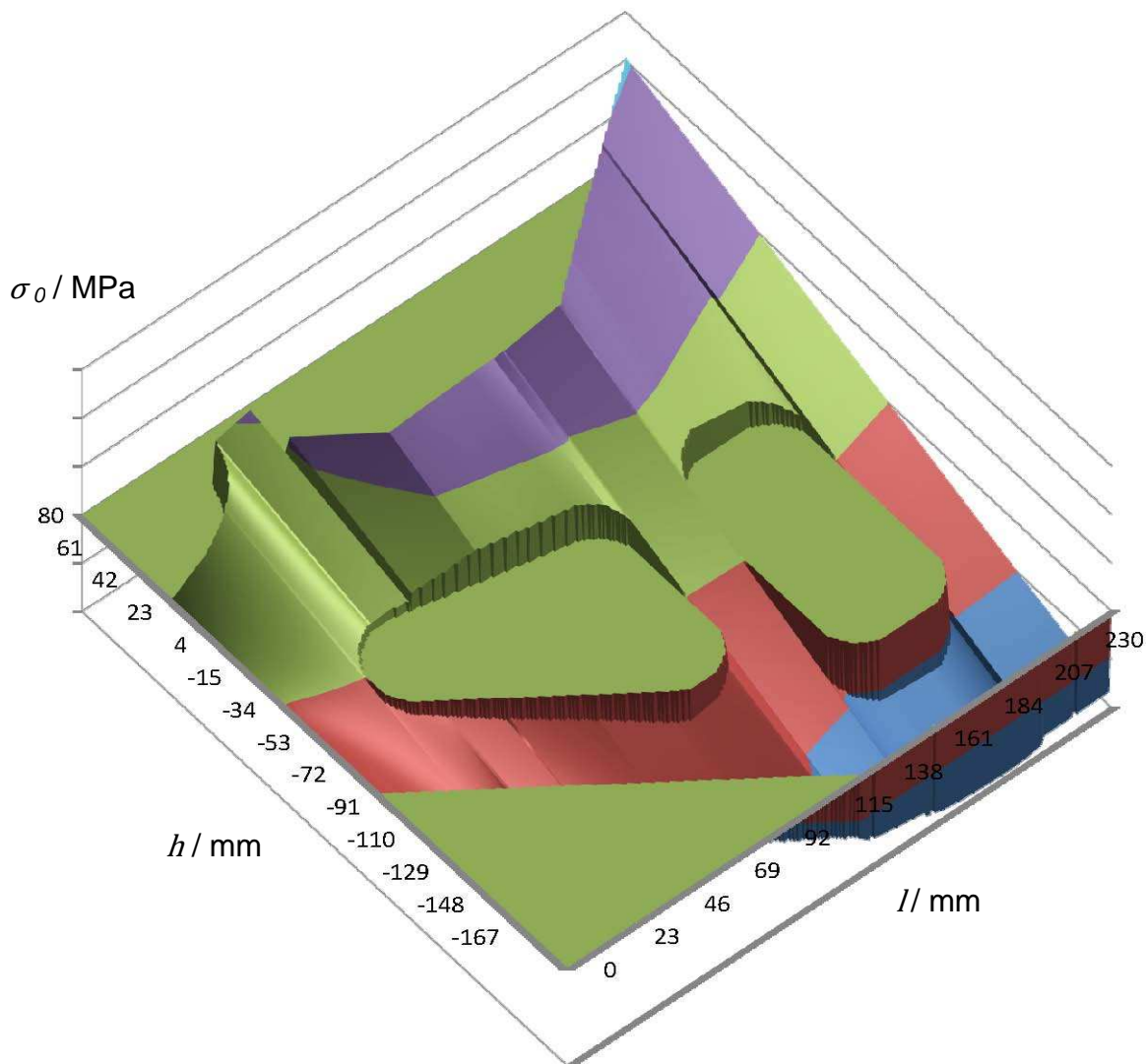
Obr. 24 Poloha roviny řezu 240



Graf 14 Závislostí napětí τ ; σ_0 ; σ_{red1} na výšce h pro řez 240

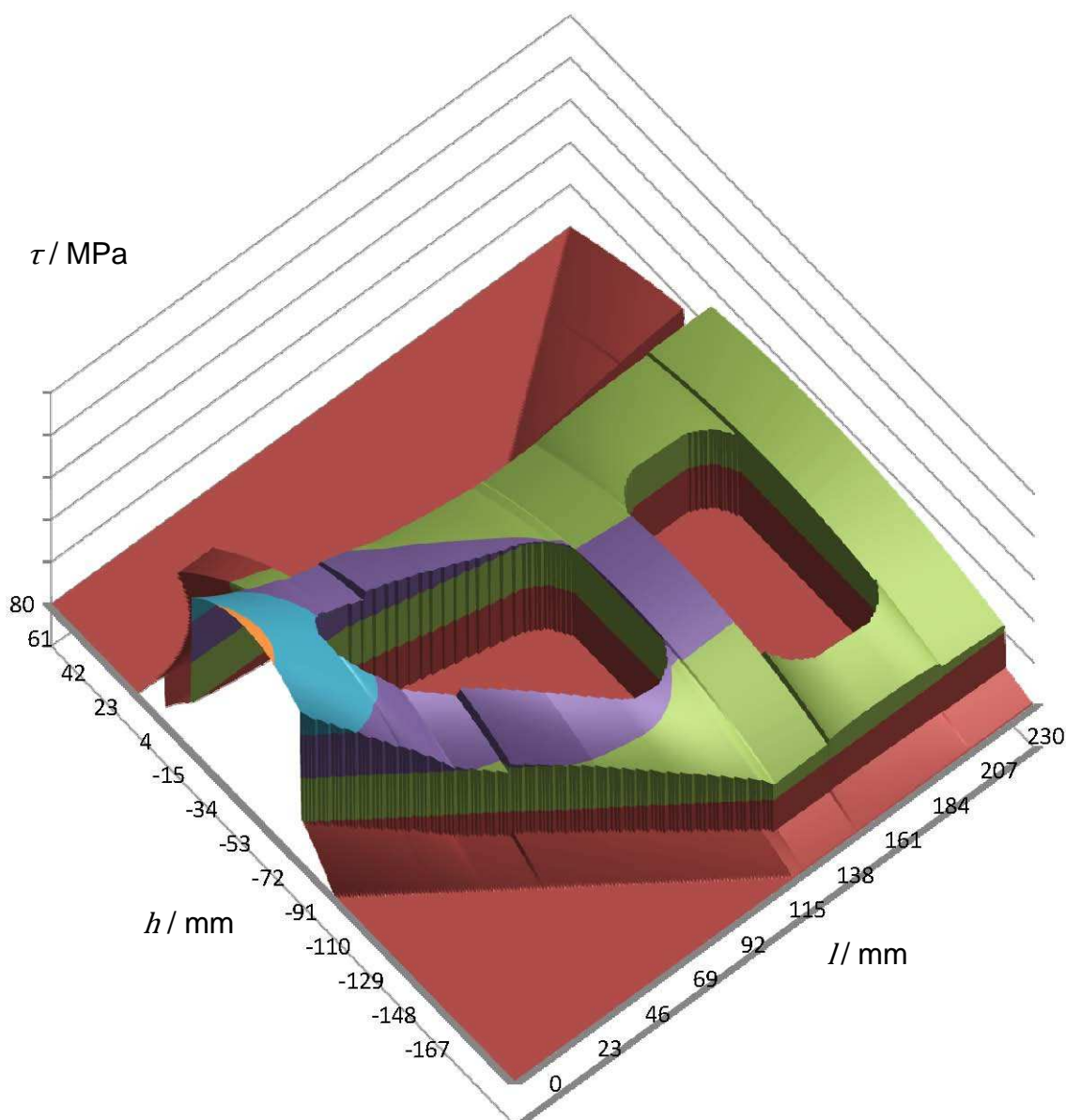
Graf 14 pro řez $l = 240 \text{ mm}$, ohybové napětí je již rozhodující.

Pro zobrazení hodnot pro všechny roviny jsou použity 3D grafy. Postupně jsou zobrazována jednotlivá napětí.



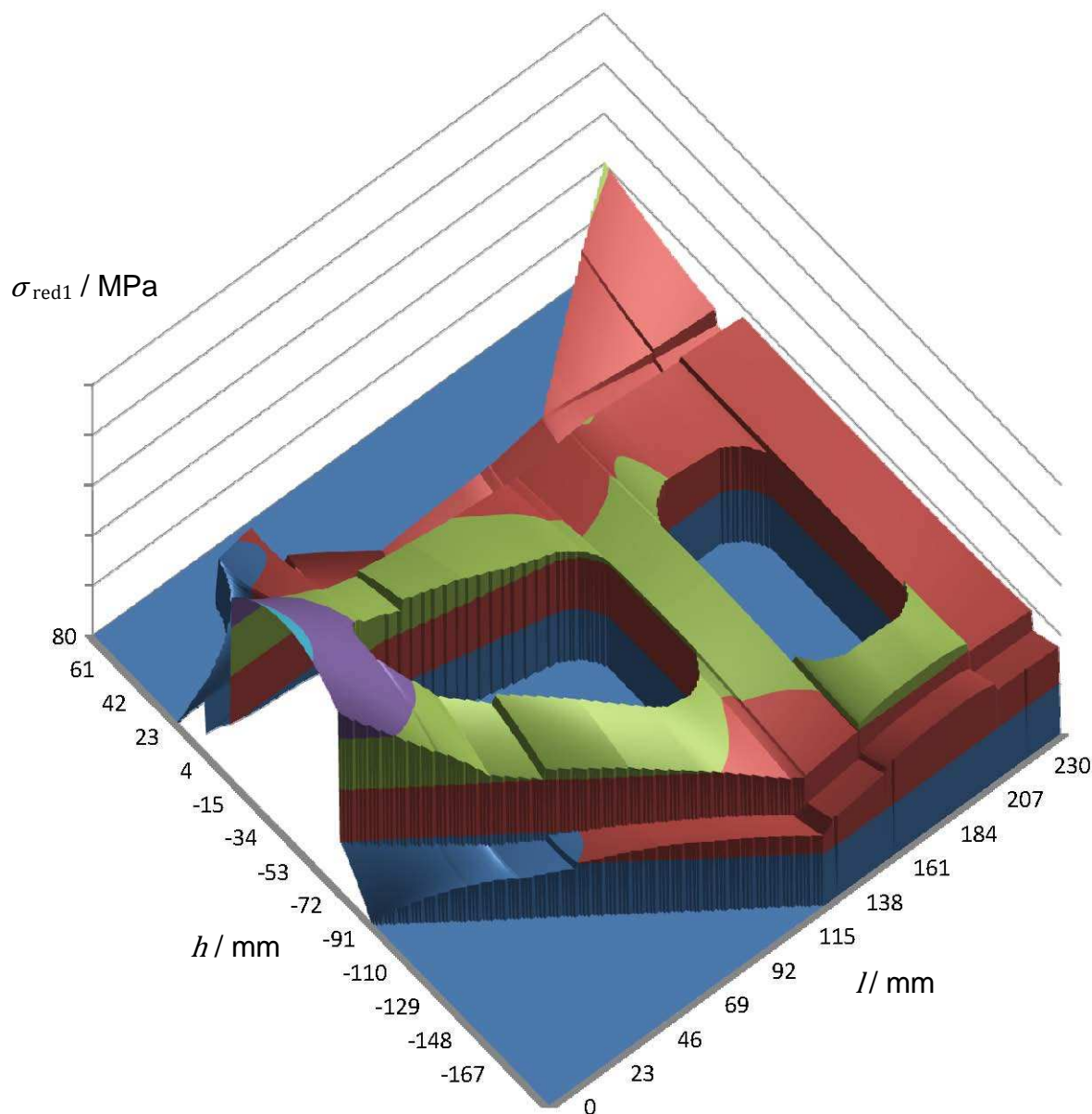
Graf 15 Závislost ohybového napětí σ_0 na výšce h a délce l

Graf 15 ukazuje postupný nárůst ohybového napětí s výškou h a délkou l . Zároveň je patrné jak neutrální osa, kde je napětí nulové nemá konstantní výšku h .



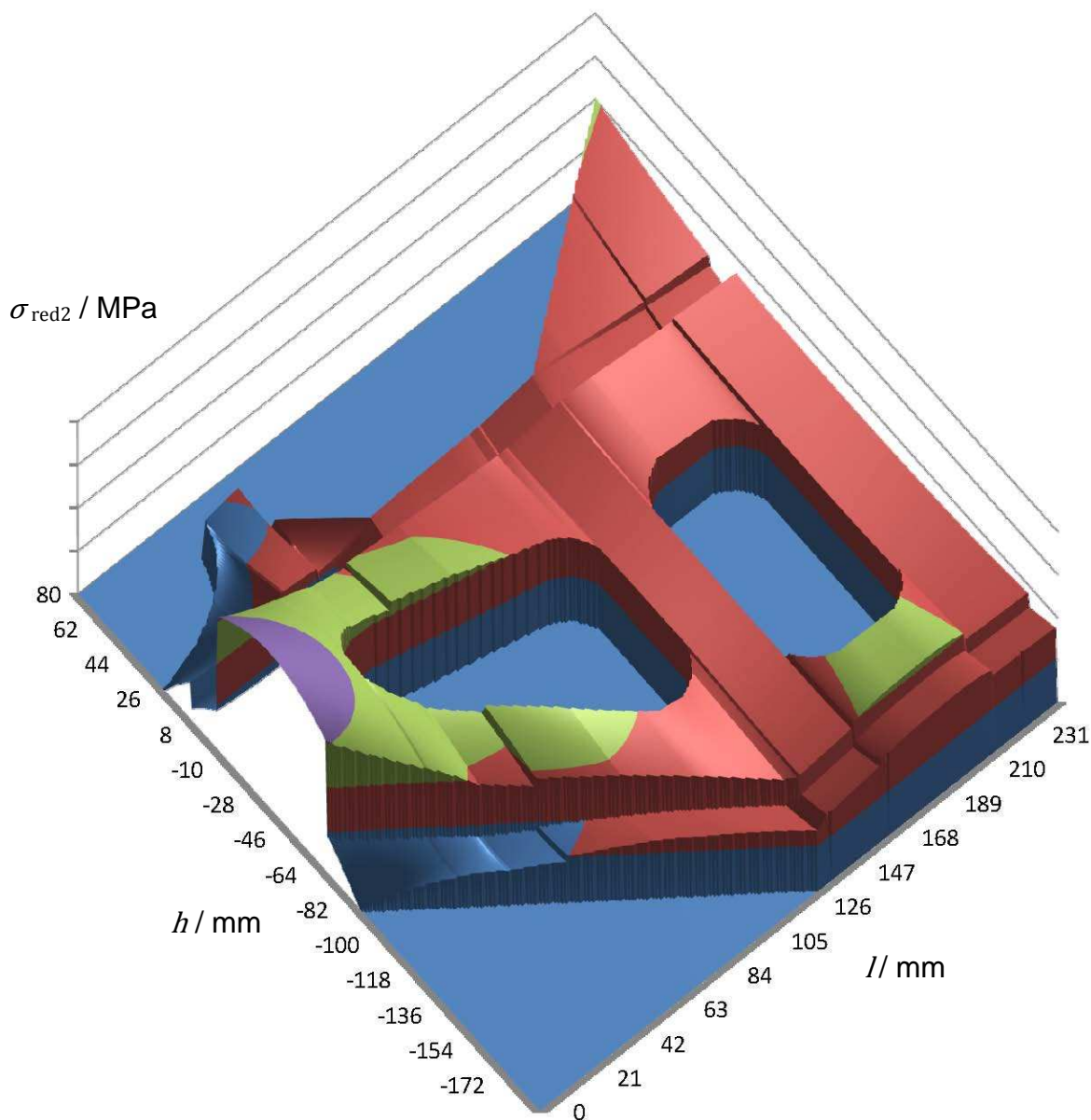
Graf 16 Závislost smykového napětí τ na výšce h a délce l

Každý průřez je dále rozdělen po výšce na libovolný konečný počet ploch. Pro každou z nich je vyjádřené smykové napětí dle Žuravského vztahu (graf 16). Čím je hák užší, tím je smykové napětí vyšší, je však závislé i na výšce h . Taktéž je patrné, že v pásnicích je smykové napětí menší než ve stojně háku, ale nelze jej zanedbat.



Graf 17 Závislost redukovaného napětí σ_{red1} na výšce h a délce l

Redukované napětí σ_{red1} dle teorie maximálních smykových napětí dosahuje nejvyšších hodnot na začátku háku v místě pod zatěžující silou (graf 17), i když v tomto místě je nulové rameno a tedy nulový ohybový moment. Z toho plyne, že vliv smykového napětí je v tomto případě rozhodující.

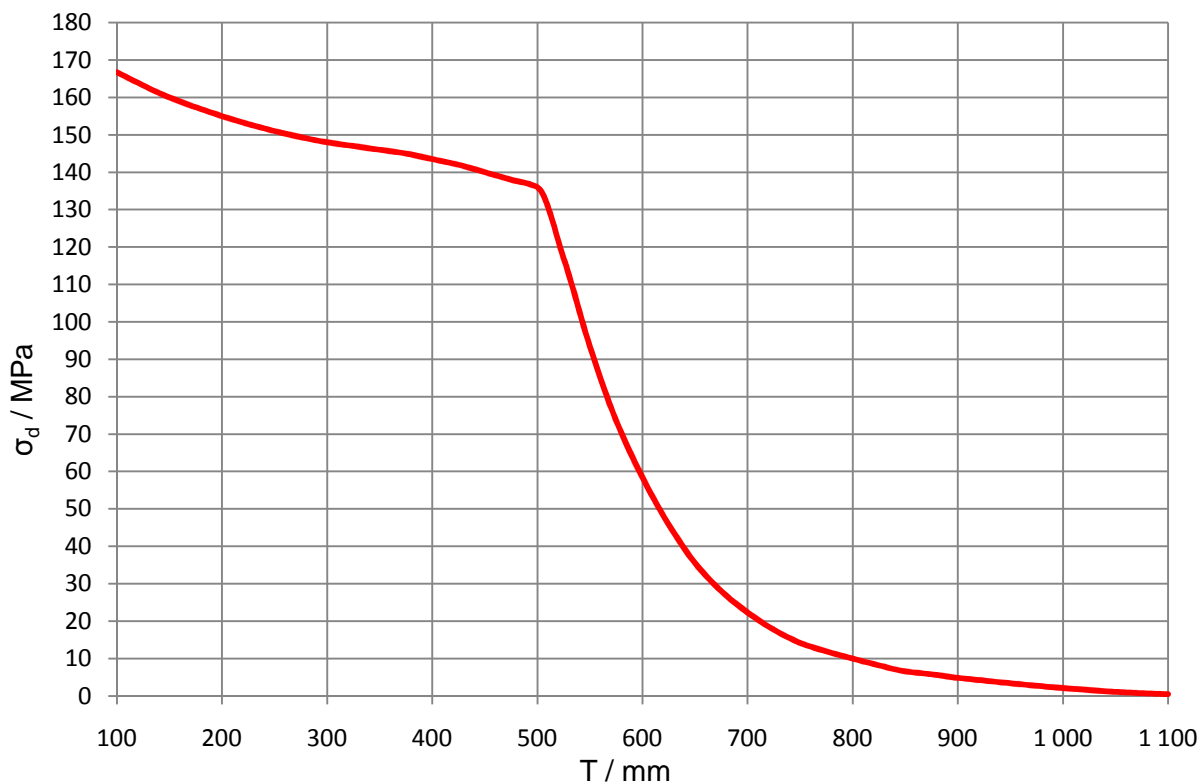


Graf 18 Závislost redukovaného napětí σ_{red2} na výšce h a délce l

Tak jako předchozí graf 17, tak i graf 18, který je určen dle podmínky HMM, zobrazuje, že největší napětí je také na začátku háku. Tento jev není tak markantní jako u předešlého grafu, ale vliv smykového napětí je stále rozhodující.

5.7 Dovolené namáhání

Dovolené namáhání materiálu háku lze odečíst z údajů od výrobce.



Graf 19 Závislost dovoleného namáhání σ_d na teplotě T pro zvolený materiál

Podle teploty materiálu jsou stanoveny hodnoty dovoleného namáhání ve dvou oblastech. Pro konkrétní zvolený materiál se dovolené napětí do teploty cca 500°C stanovuje z meze kluzu. Jak je patrné mez kluzu se ze zvyšující se teplotou snižuje. Mez kluzu je dělena bezpečnostním součinitelem $k_s = 1,5$.

Hlavním faktorem, který ovlivňuje hodnotu dovoleného namáhání při teplotách nad 500°C (u tohoto materiálu) je tzv. tečení materiálu (creep).

5.7.1 Tečení materiálu (creep)

Tečení materiálu je jev, kdy při stejném zatížení roste trvalá plastická deformace s časem. U materiálu jako je např. hliník, olovo, plastické hmoty, sklo a jiné se creep projevuje i za pokojových teplot. U ocelí se creep projeví až u teplot zvýšených.

Tab. 10 Počáteční teplota tečení materiálu

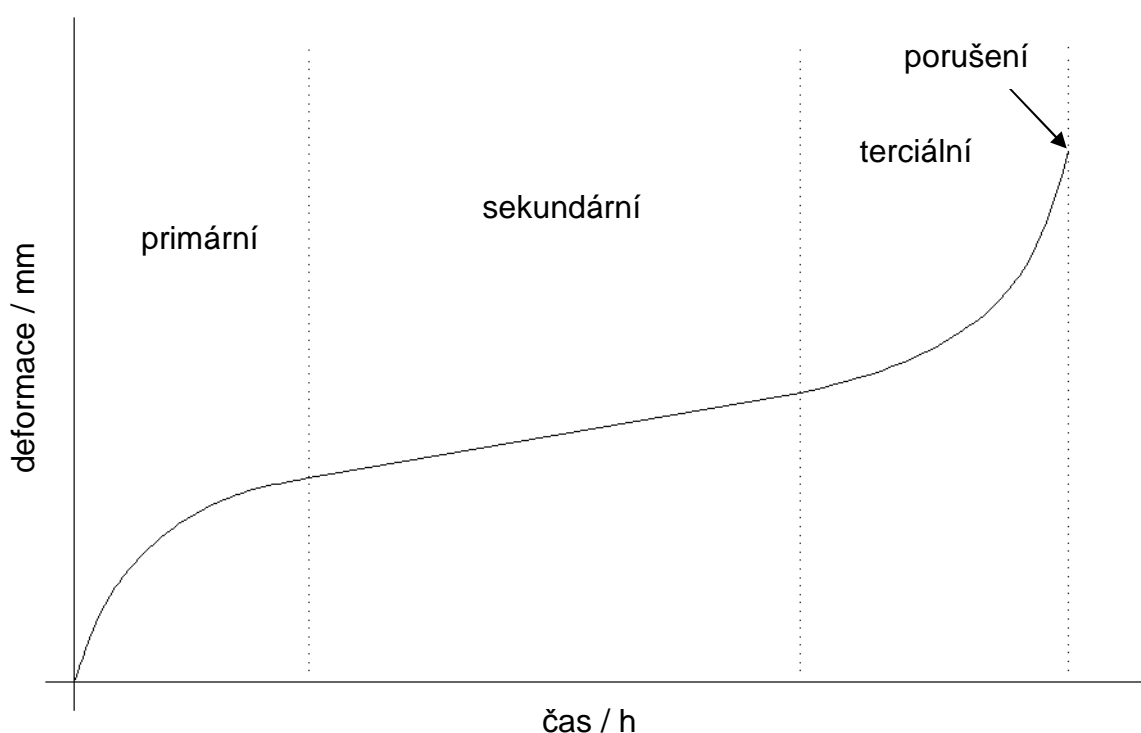
Materiál	teplota
Uhlíková ocel	380 °C
Nízkolegovaná ocel	420 °C
Austenitická ocel	520 °C
Chromniklová slitina	600 °C

Fyzikální podstata creepu u kovových materiálu má dva základní mechanismy.

Dislokační creep – defekty krystalické mřížky materiálu nazývané dislokacemi se pohybují přes mřížku, překonávají přirozenou pevnost mřížky a také odpor různých příměsí tzv. šplh dislokací.

Difuzní creep – je pohyb velkého množství atomů ze zóny tlaku do zóny tahu.

Dislokační creep je nejvýznamnější mechanismem tečení. Dislokační creep vykazuje silně nelineární závislost deformace na napětí. (Nortonův zákon)



Graf 20 Deformační křivka creepu



Deformační křivka creepu (graf 20), popisuje závislost trvalé plastické deformace na čase. Graf je rozdělen na tři oblasti:

Primární creep – rychlost deformace se zpomaluje.

Sekundární creep – rychlost deformace je konstantní. Tato oblast je nejpodstatnější.

Terciální creep – rychlost deformace se zrychluje až do porušení. Tato oblast je nestabilní.

Způsoby creepového porušení:

Houževnaté – vlivem tečení dochází k zúžení zatěžovaného průřezu, tím roste napětí až do lomu.

Křehké – uvnitř materiálu dochází k tvorbě kavit (dutin), jejich spojování, což opět vede k zmenšení průřezu, růstu napětí až k lomu. Tento způsob porušení je častý, nevaruje vnější změnou rozměru, tudíž je nebezpečnější.

Kombinace creepu, koncentrace napětí a únavy může vést ke křehkému porušení i za velmi vysokých teplot.

Fenomenologický přístup k jevům tečení. Neexistuje fyzikálně podložená teorie tečení – tečení je velmi komplikovaný jev. Na základě experimentálních zkoušek se hledá závislost mezi třemi hlavními parametry tečení, kterými jsou deformace, napětí a čas. Nejčastěji používaným vztahem je Nortonův zákon $\epsilon = k \sigma^n t$.

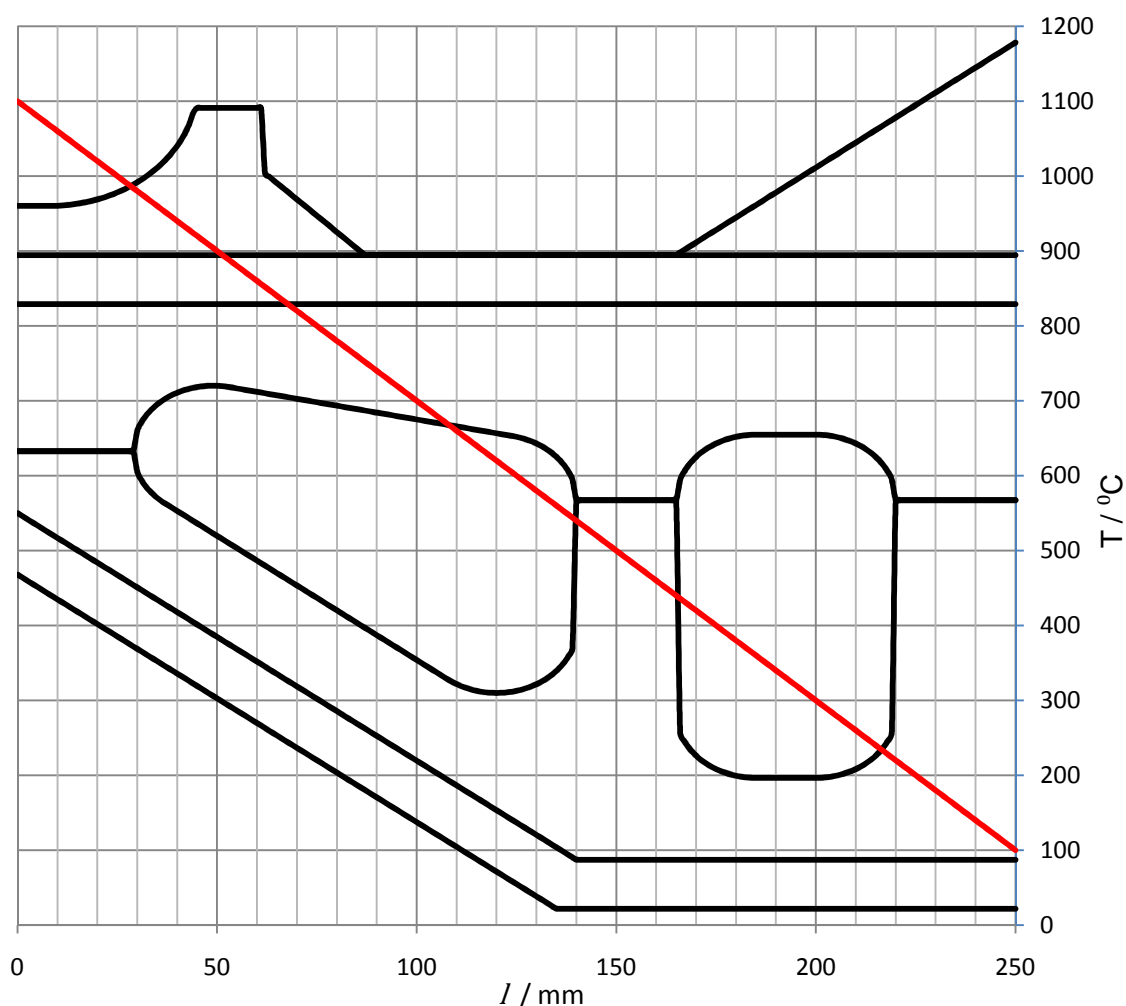
Na základě znalosti creepu je tedy nutné podotknout, že hodnoty dovoleného namáhání (graf 19) jsou v oblasti creepu závislé i na čas. V petrochemickém průmyslu je standardní doba životnosti navrhovaných zařízení 100 000 hodin. Proto většina výrobců uvádí dovolené namáhání pro teploty v creepu právě pro 100 000 hodin. Graf 19 je taktéž pro hodnotu 100 000 hodin.

Pro přepočet hodnot (čas, teplota, napětí) je možné využít tzv. Larson–Millerova parametru.

5.7.2 Stanovení teploty háku

Pro určení dovoleného namáhání je nezbytné znát teplotu háku. Jak už bylo zmíněno, obvyklý postup předpokládá konstantní teplotu pro celý hák. Tento postup je značně konzervativní. Skutečnou teplotu háku není jednoduché vyjádřit. Pokud se to podaří, poskytuje to prostor pro dost výrazné změny v konstrukci háku.

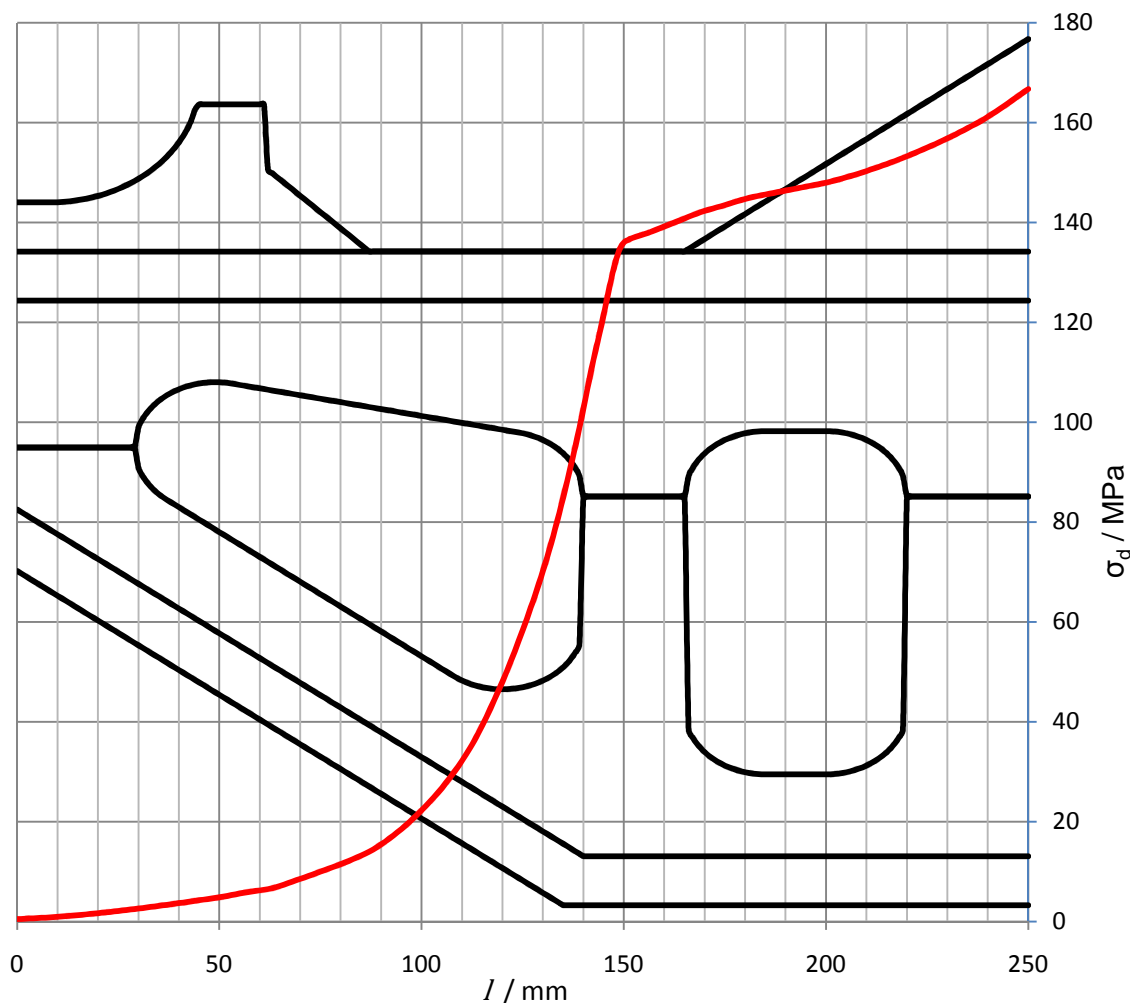
Pro následující posouzení je zvolen velmi zjednodušující předpoklad, že teplota se snižuje lineárně s rostoucí délkou l háku (graf 21). Extrémní rozdíl teplot na začátku a konci háku 1000 °C byl zvolen záměrně větší, aby byl zřetelný jeho potenciál v konstrukci háku. Skutečný rozdíl teplot v háku pravděpodobně nedosahuje takových hodnot a rovněž průběh teploty po délce háku nebude lineární.



Graf 21 Závislost zvolené teploty T na délce l

5.7.3 Dovolené namáhání háku v závislosti na délce l

Dosažením hodnot dovoleného namáhání σ_d (graf 19) do hodnot teplot (graf 21) vznikne nový graf 22, kde je znázorněné dovolené namáhání σ_d jako funkce délky l .



Graf 22 Závislost dovoleného namáhání σ_d na délce l

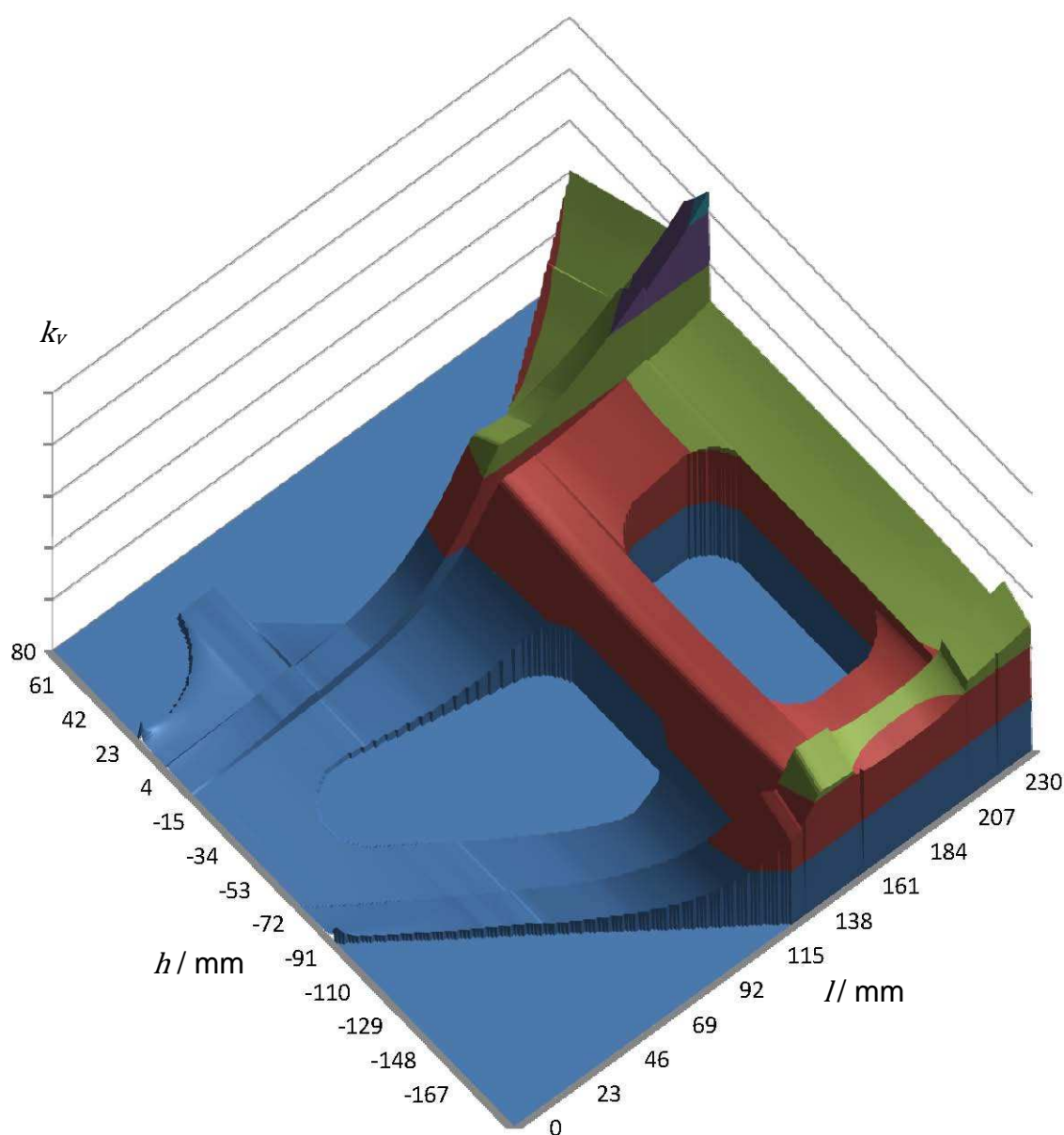
Graf 22 ukazuje, že dovolené namáhání σ_d se v háku výrazně liší. Minimální hodnota je asi 0,5 MPa na začátku háku a na konci háku je asi 170 MPa, což je 340 krát více. Proto předpoklad stejné teploty a tím i stejného dovoleného namáhání je extrémně konzervativní. Tento konzervatismus pravděpodobně pramení z velmi obtížného stanovování skutečné teploty háku, jak bude zmíněno dále.

5.8 Koeficient využití

Pomocí redukovaného napětí v háku σ_{red1} (graf 17), vyvolaného zatížením a dovoleného namáhání σ_d (graf 22) lze vyjádřit tzv. **koeficient využití** k_v (graf 23, obr. 25).

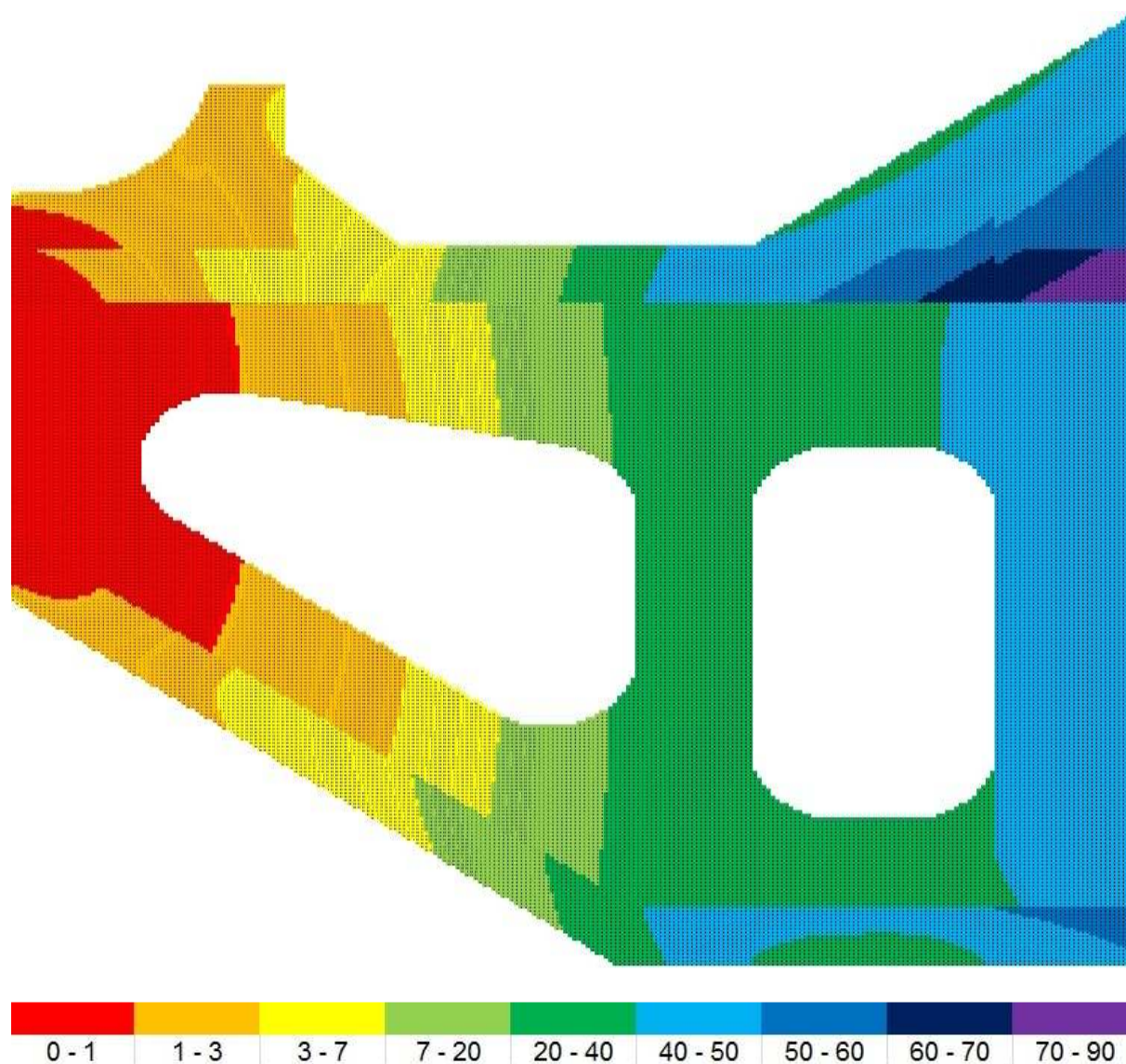
Koeficient využití k_v

$$k_v = \frac{\sigma_d}{\sigma_{red1}}. \quad (112)$$



Graf 23 Závislost koeficientu využití k_v na výšce h a délce l

Pokud je koeficient využití $k_v = 1$, pak je hák navržen přesně s bezpečností 1,5 vůči mezi kluzu nebo dlouhodobé pevnosti při tečení. Při $k_v < 1$ je oblast v háku poddimenzovaná a při $k_v > 1$ je oblast háku předdimenzovaná. Koeficient bezpečnosti k_v je pomocným vodítkem při optimalizaci tvaru háku, poddimenzovanou oblast je nutné „posílit“ a předdimenzovanou oblast je možné „oslabit“.

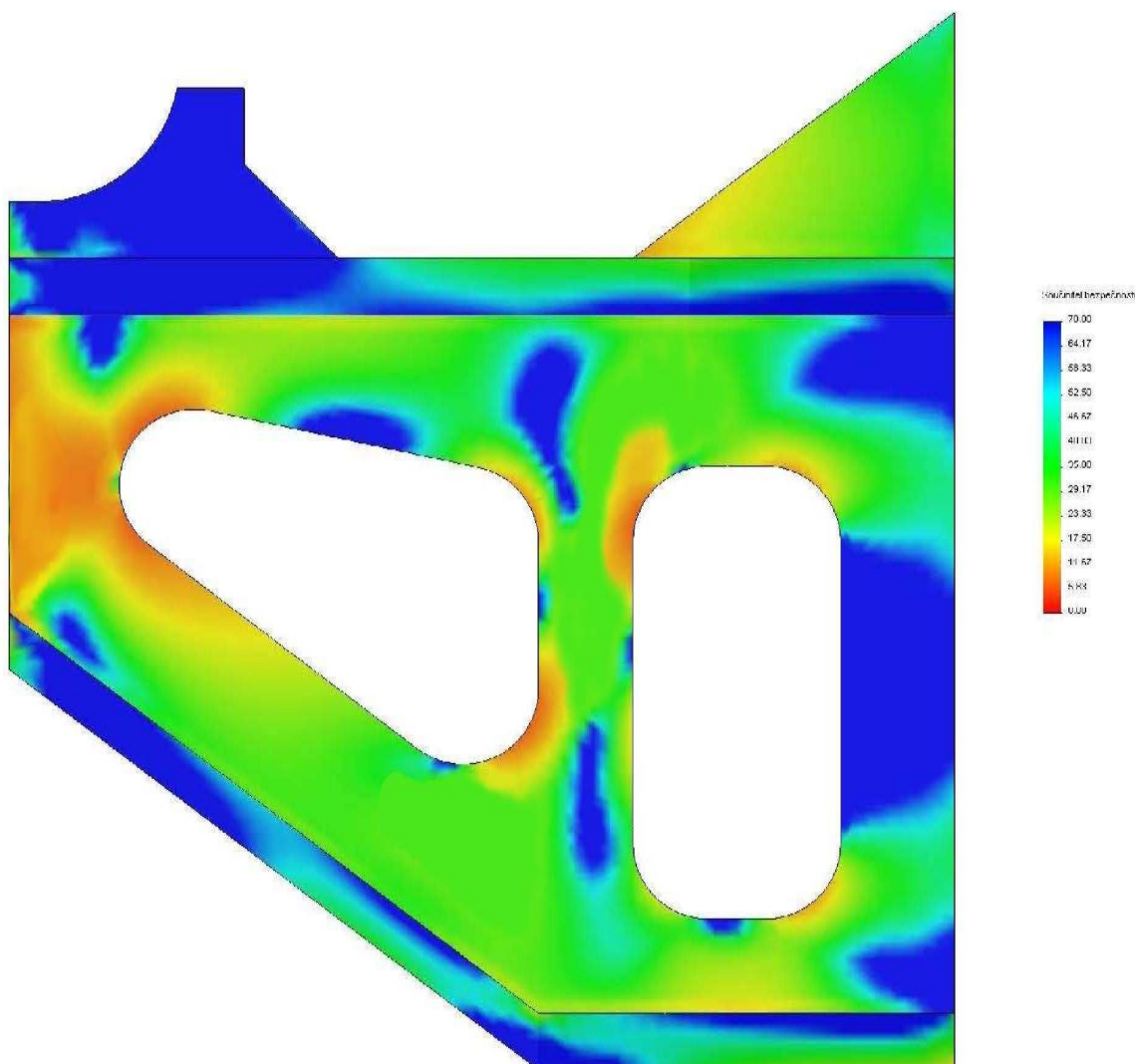


Obr. 25 Rozložení koeficientu využití k_v v háku

Z grafu jsou zřejmé poddimenzované a předdimenzované části háku. Prakticky není možné hák navrhnout přesně tak, aby všechny jeho části měly součinitel využití k_v roven 1. Je ale nezbytné, aby žádná jeho část neměla součinitel využití k_v menší než 1. Na obr. 25 je tato nepřipustná hodnota znázorněna červeně. Naopak zelená, modrá a fialová oblast je velmi předdimenzovaná.

5.9 Porovnání výsledků MKŘ – MKP

Na první pohled jsou obr. 25 a obr. 26 značně rozdílné. Proč tomu tak je, bude vysvětleno později v kapitole 5.10 Zhodnocení MKŘ. Obě metody shodně ukazují, že oblast na začátku háku je poddimenzovaná a naopak podstatná část háku je předimenzovaná.



Obr. 26 Rozložení koeficientu využití k_v v háku – MKP

Metoda konečných prvků je uznávaná výpočetní metoda, která se osvědčila v technické praxi. Porovnání výsledků MKŘ a MKP ukazuje, že metodu konečných prvků lze pro návrh háku použít.



5.10 Zhodnocení MKŘ

Metoda konečných řezů má svá pravidla a omezení, jež jsou shrnuty v následujících odstavcích.

5.10.1 Výhody

Jako hlavní výhodu MKŘ lze považovat její relativní jednoduchost. Tuto metodu lze sestavit se základními znalostmi matematiky, pružnosti a pevnosti. Všechny vztahy jsou dostupné, srozumitelné a ovlivnitelné.

Další podstatnou výhodou je dostupnost (cena) metody. Potřebné výpočty lze provést na běžném osobním počítači s použitím dostupného softwaru. Výpočty byly provedeny v tabulkovém kalkulátoru MS Excel. Excel se zprvu zdál nejdostupnější, postupně ale narážel na své limity, které bylo potřeba vyřešit. Po těchto zkušenostech lze doporučit jiný způsob výpočtu.

Podstatná výhoda oproti obvyklému postupu navrhování háku (viz kapitola 4.1) je kontrola všech průřezů včetně nalezení kritického průřezu.

V MKŘ je velmi jednoduché hodnocení, zda-li hák vyhovuje či nikoli. Na rozdíl od MKP, kde je nutné výsledky napjatosti interpretovat a poměrně složitě hodnotit.

Pomocí MKŘ lze spolehlivě a levně navrhnout základní tvar a dimenze háku pro různé situace.

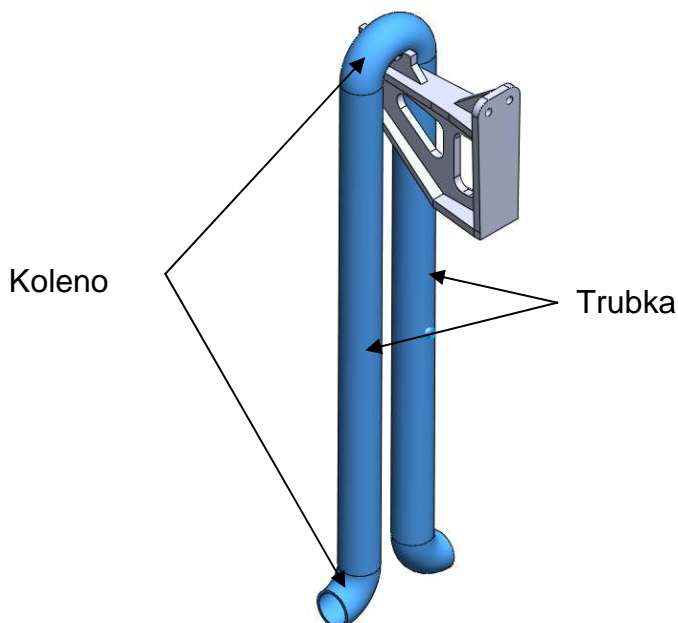
5.10.2 Nevýhody

MKŘ nezachytí změnu tuhosti háku, koncentrace napětí, deformace apod. Rozložení napjatosti v reálném tělese je vhodněji modelováno v MKP. Z těchto důvodů jsou obr. 25 a obr. 26 výrazně jiné.

6 Zatěžující síla

6.1 Zjednodušený předpoklad.

Hmotnost připadající na jeden hák je dána součtem hmotností dvou přilehlých trubek, dvou kolen a hmotnost ohřívaného média v nich obsažených, katalyzátoru (je-li přítomen v případě reakčních pecí), případně další příslušenství jako vedení, místní izolace atd.



Obr. 27 části připadající na jeden hák

Ohřívané médium postupně přejímá teplo z trubek, neboli do trubkového systému vstupuje „chladnější“ a vystupuje „teplejší“. Tentýž efekt nastává jak v rámci celého proudu (v peci může být více proudů) tak i v rámci dvojice trubek a kolen připadajících na jeden hák.

Ohřívané médium může mít různé skupenství. Plynné, kapalné a jejich kombinaci. V případě, kdy je ohřívané médium plynné, se může jeho hustota dost výrazně měnit v závislosti na teplotě. Avšak rozdíl hmotnosti teplejšího a chladnějšího plynného média připadajícího na jeden hák je zanedbatelný v porovnání s hmotností trubky. Pak lze hustotu média považovat za konstantní. Pokud je ohřívané médium kapalné tak se jeho hustota se zvyšující se teplotou příliš nemění tudíž rozdíl hmotnosti teplejšího a chladnějšího kapalného média připadajícího na jeden hák lze také zanedbat. Tyto dvě varianty lze dokonce paušálně použít na celý proud, neboli pro všechny háky lze použít stejnou adekvátní hmotnost média a přitom je chyba zanedbatelná.

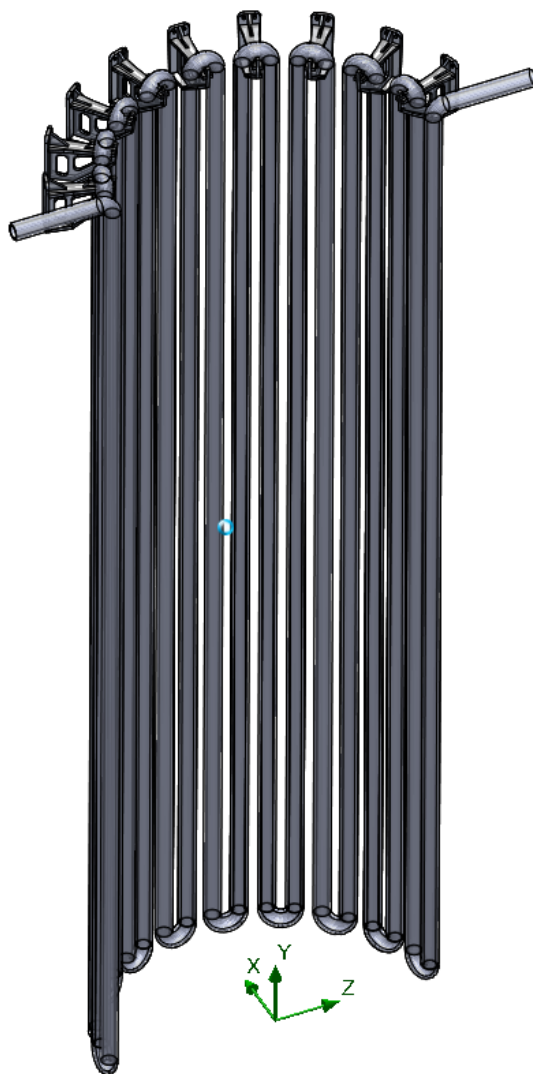
Jiná situace nastane v případě, že do proudu vstupuje médium kapalné a prostřednictvím dodávaného tepla se změní (odpaří) na médium plynné. Hmotnostní tok sice zůstává zachován, avšak rychlost proudění, hustota a tím pádem hmotnost, připadající na jeden hák, se dost výrazně liší. V technické praxi je běžné, že se tento jev zanedbává a předpokládá se průměrná hustota média. Toto zanedbání se na

výsledné síle neprojeví nikterak závažně, ale již je měřitelné a za určitých okolností může sehrát svou roli.

Výsledné zatížení připadající na jeden hák ovlivňuje kromě hmotnosti media ještě několik dalších faktorů.

6.2 Zpřesněný předpoklad

V zpřesněném předpokladu zatěžující síly bude dále zmíněno několik jevů, které výrazně ovlivňují její velikost. Z obr. 28 a obr. 29 je patrné, že zavěšení jednoho proudu trubkového svazku na háky je staticky neurčitě a je potřeba určit reakce v jednotlivých podporách. Poměrně složitý model je možné zjednodušit, „rozvinout“.



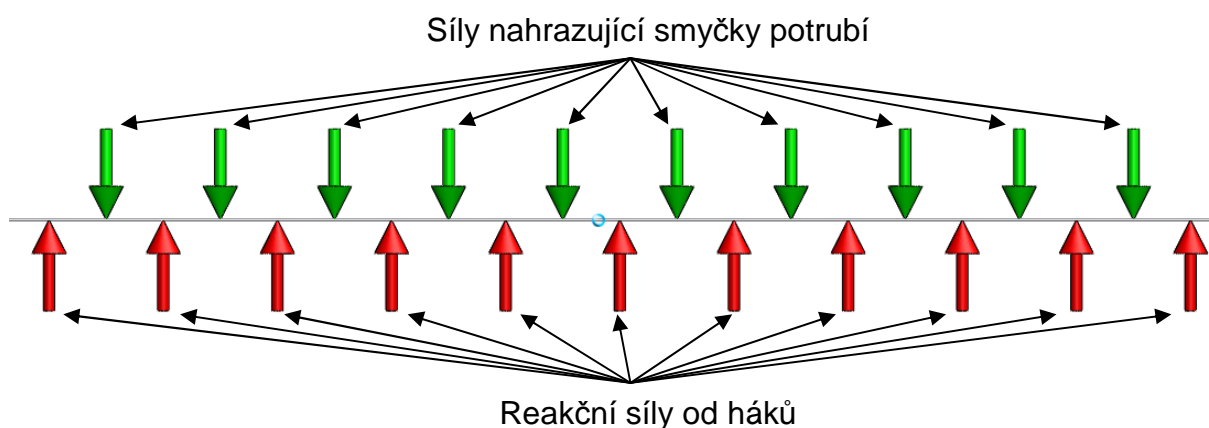
Obr. 28 Závěsné body trubkového systému



Obr. 29 Závěsné body rozvinutého trubkového systému

6.2.1 Nosník na n podporách

Trubkový svazek pak lze nahradit nosníkem na n podporách. Svislá smyčka se nahradí adekvátní silou. Nosník je několikrát staticky neurčitý. Rozteč mezi jednotlivými podporami je v tomto případě stejná. Může však nastat situace, kdy rozteč bude různá. V obou případech lze určit poměr jednotlivých sil v reakcích např. pomocí tzv. třímomentových vět.



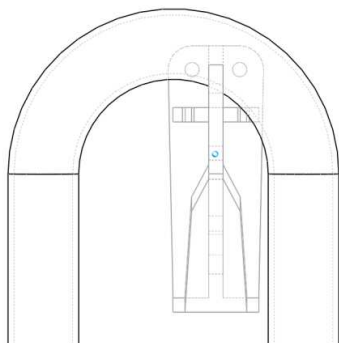
Obr. 30 nosník na n podporách

Než-li začne přesné vyčíslování jednotlivých reakčních sil, je důležité zohlednit několik následujících bodů.

6.2.2 Vyosení potrubí

Vlivem výrobní tolerance trubkových hadů i umístění háků na plášti pece může nastat situace, kdy ne každý hák je v kontaktu s trubkovým hadem. Tento hák není zatížený a je v sestavě „zbytečně“. Hmotnost, jež připadá na nezatížený hák, se přerozdělí na háky ostatní. V extrémním případě se může stát, že celý had bude uložen pouze na dvou hácích. Tento jev lze eliminovat při montážním sestavování tak, že při usazování trubkového svazku na háky se použijí vymezovací podložky, které vyplní případné vůle mezi háky a trubkovým svazkem.

Vlivem výrobní tolerance se může také stát, že trubkový had nemá dodrženu svoji geometrii a s hákem sice je v kontaktu, ale ne v ideální poloze (obr. 31 a obr. 32). To může změnit směr zatěžující síly a minimálně její velikost. Tuto změnu směru síly je nutné uvažovat při konstrukci háku. Vyosení navíc mění rameno zatěžující síly, což je nutné zohlednit při výpočtu.



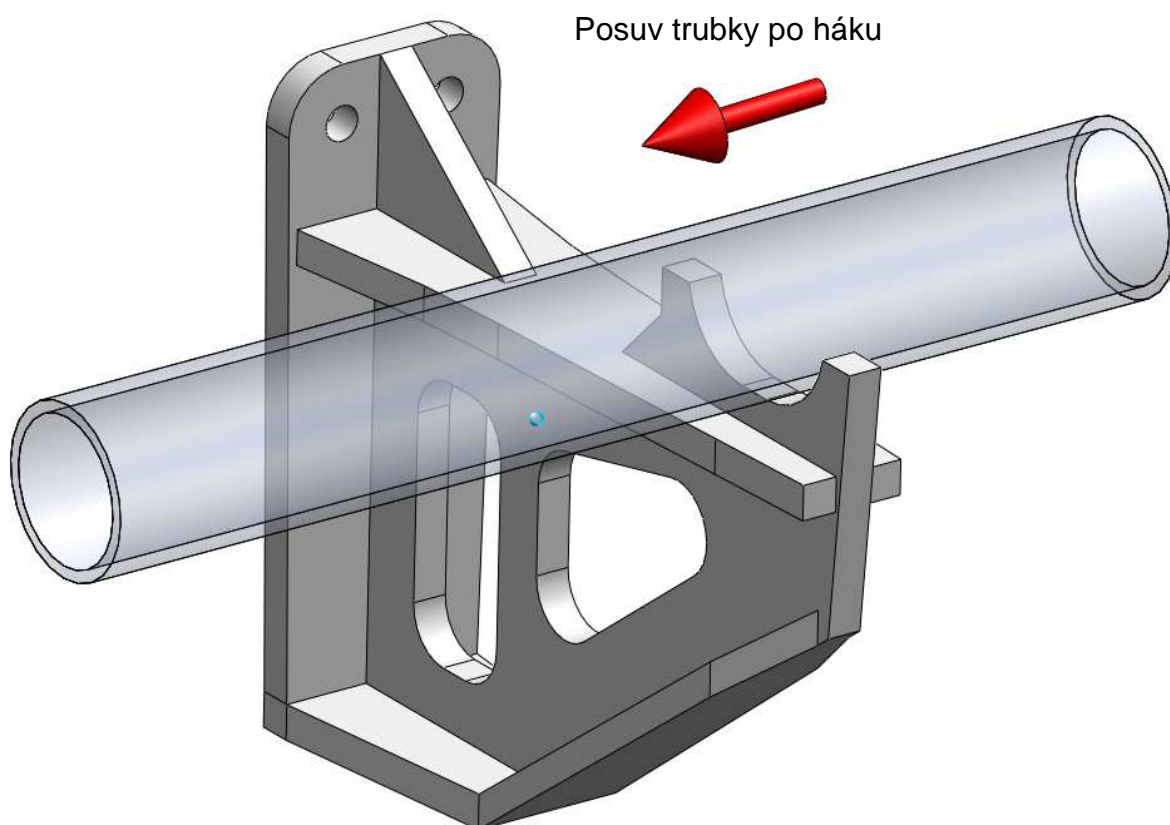
Obr. 31 Vyosené potrubí na háku



Obr. 32 Radiační komora – vyosené potrubí na hácích

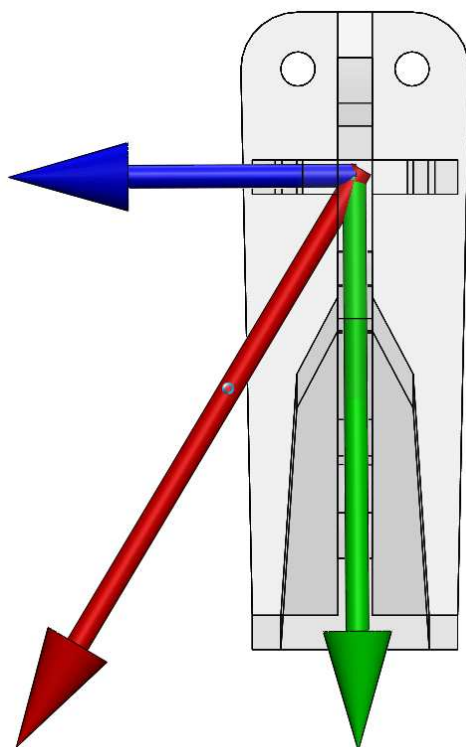
6.2.3 Vodorovná trubka

V radiaci válcové pece bývají svislé trubky. V radiaci šachtové pece a v konvekcích obou pecí bývají trubky vodorovné. Vlivem tepelné dilatace trubky mění nezanedbatelně svoji délku, čímž dochází k posuvu trubky po háku (obr. 33). Vzniká tak tření, ze kterého plyne třecí síla. Ta je dána součinem síly normálové (síla od hmotnosti) a součinitelem tření. Součinitel tření mezi hákem a potrubím nabývá běžně hodnot od 0,1 po 0,3. Tato hodnota se může měnit s časem. Na třecí součinitel má vliv jednak koroze povrchu a jednak povrchová drsnost případně nečistoty na třecí ploše. Při překročení třecí síly dojde k prokluzu trubky, tím však třecí síla nezanikne. V praxi se může stát, že při kontaktu háku a potrubí dojde k „mikrosvarům“ nebo k „zakousnutí“ háku do trubky, což znemožní prokluz trubky a zavádí do háků a do celé pece nadměrné zatížení. To může způsobit destrukci háku, trubky, nebo pláště v němž jsou háky uloženy.



Obr. 33 Vodorovná trubka – posuv

Hák je silou od hmotnosti potrubí ohýbán ve svislém směru. Od třecí síly je navíc ohýbán ve směru vodorovném. Sílu od hmotnosti a sílu třecí je nutno sečíst, čímž vznikne výslednice sil, která pak nepůsobí v rovině symetrie háku (obr. 34) a vyvolá nerovnoměrné zatěžování háku. Třecí sílu nelze při výpočtu vodorovných trubek zanedbat, jelikož podstatně zvětšuje velikost výsledné síly.



Obr. 34 Výslednice zatěžující síly na háku

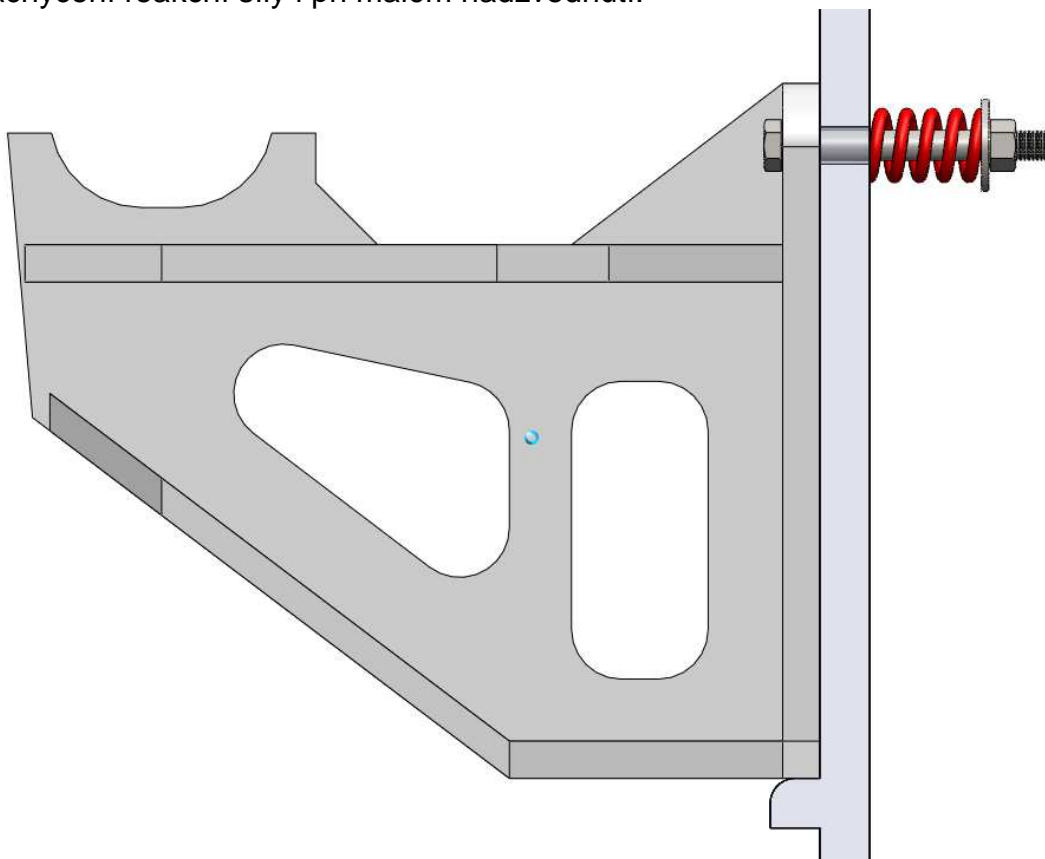
6.2.4 Vliv přesnosti určení zatížení háku

Výše zmíněné jevy se v praxi velmi obtížně vyčíslují. Některé další jevy se dokonce objevují nahodile. Proto se pro výpočet zatěžující síly používá zjednodušeného předpokladu. Teoretická zatěžující síla se vynásobí koeficientem, jenž v sobě zahrne všechny výše zmíněné jevy. Tento koeficient se pohybuje v rozmezí 2 až 3. Hák tak díky tomuto koeficientu má dvakrát až třikrát větší únosnost, ale úměrně tomu je vyšší i jeho hmotnost a cena. Koeficient se volí na základě tzv. odborného odhadu, který pramení ze zkušeností konstruktéra.

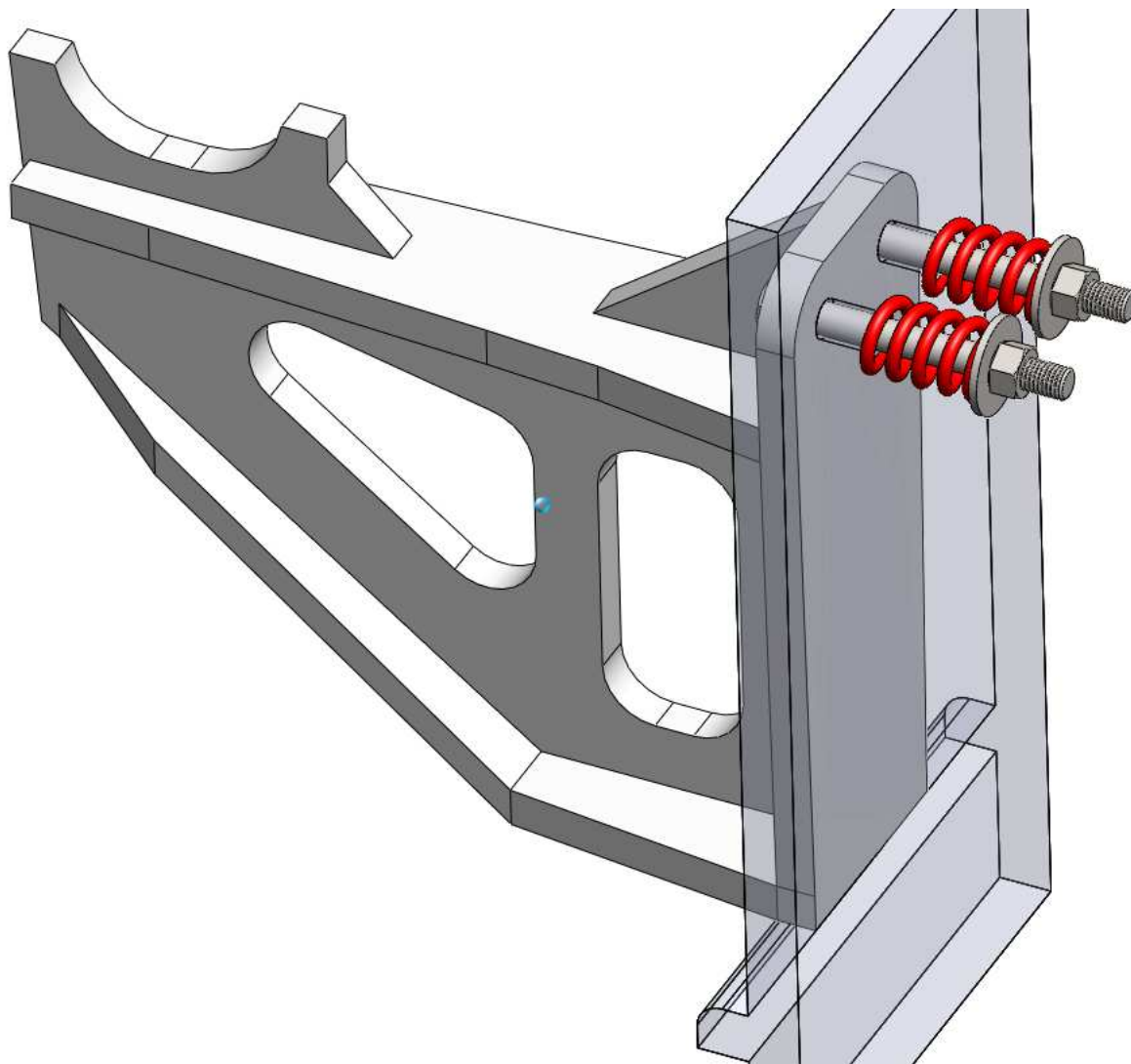
6.2.5 Pružný hák

Teplota trubek v peci není rozdělena rovnoměrně. V případě radiace válcové pece se teplota trubek mění i po výšce. Trubka je nejteplejší asi v jedné třetině, kde plamen vyzařuje nejvíce tepla. Teplota se mění i po obvodu trubky, protože největší zdroj záření od plamene je pouze z jedné strany. Liší se i průměrná teplota jednotlivých trubek v jednom proudu, protože se medium uvnitř potrubí postupně ohřívá. To vše má vliv na nerovnoměrnou tepelnou dilataci. I když jsou při montáži vymezeny vůle mezi potrubím a háky tak při provozu dojde ke změně geometrie trubkového svazku. Minimální změna způsobí „nadzvednutí“ trubkového svazku nad hák a nastane jev popsáný výše. V praxi bývá toto „nadzvednutí“ asi do 5 mm. Když se jedna dvojice trubek relativně zkrátí oproti ostatním, tak jejich hák zkrácení neumožní a zvedne se tak zbytek trubkového svazku. Tím dojde ke značnému přetížení daného háku. Nerovnoměrná dilatace taktéž způsobuje vysovení potrubí z háků, jak bylo popsáno výše.

Změnu geometrie trubkových svazků při najíždění na provozní stav (nadzvedávání) lze do určité míry eliminovat flexibilitou polohy háku tzv. **pružným hákem**. Jeho podstata spočívá v jednoduché úpravě přichycení na plášť, jak je znázorněno na obr. 35 a obr. 36. Místo standardně používaných šroubů se použijí tzv. pružné šrouby, které zachycují horizontální sílu. Sílu svislou zachycuje výstupek přivařený k plášti pece. Reakční síla háků se mění v závislosti na poloze (na stlačení pružiny). Je vhodné volit rozmezí 70% až 130% ideální reakční síly, čímž zajistí zachycení reakční síly i při malém nadzvednutí.



Obr. 35 Hák s pružnými elementy – bokorys



Obr. 36 Hák s pružnými elementy – 3D

Nevýhodou tohoto řešení je snížení kontaktní plochy háku s pláštěm tím i omezení přenosu tepla a ochlazování háku. Navíc jsou na pružinu kladeny extrémní požadavky. Toto řešení je zatím pouze teoretickou úvahou.



7 Technologie výroby

Hák je vlivem vysokých teplot vystaven extrémnímu tečení materiálu. Proto se volí materiály, které jsou vůči tomuto jevu odolné. Velmi dobrých parametrů za vysokých teplot dosahuje speciální keramika. Má však vysokou křehkost. Její záporné vlastnosti ji nedovolují pro háky použít.

Jako nejvýhodnější se dnes jeví speciální slitina chromu a niklu. Ta má z kovových materiálů nejvyšší odolnost vůči vysokým teplotám, korozivzdornost a jiné. Zároveň není křehká. Má ale i negativní vlastnosti. Prakticky se tento materiál velmi obtížně svařuje. Tváření za studena klade na zařízení zvýšené nároky. Obrábění je díky vysoké tvrdosti také náročnější. Vystává otázka, jakou technologií hák vyrobit.

Možný způsob výroby je zápusťkové kování, ale kvůli několika málo kusům se nevyplatí vyrábět velmi drahou kovací formu. Situace by se změnila při větších objemech. V praxi platí: „Co pec, to nový hák“. Kdyby se vyvinul „ideální“ tvar háku, a vyvinula by se určitá řada háků podle skupin zatížení, mohly by se háky vyrábět sériově. Tím by se náklady na výrobu kovacích forem rozmělnily. Kování má oproti odlévání podstatnou výhodu v lepším zpracování materiálu. Stejný materiál háku odlitý a vykovaný má výrazně odlišné vlastnosti ve prospěch kování. Avšak kované háky se v praxi prakticky nevyskytují.

Na CNC strojích lze dnes vyrobit libovolný tvar háku. Nevýhoda této výroby spočívá v nepřijatelném množství odpadu v podobě odebraných třísek. Navíc hák obrobený má ještě horší parametry než odlévaný, díky porušení „vláken“ v materiálu.

V současné době se používá na výrobu háků odlévání roztaveného kovu do pískových forem. Odlévání má svá specifika a omezení, která je nutné zohlednit při konstrukci háku. Prakticky to znamená, že se díky odlévání částečně zvýší hmotnost háku. Např. technologické úkosity kvůli vyjímání modelu z formy, zaoblení ostrých hran atd.



8 Teplota háku

Již několikrát byla zmiňována teplota háku. Při obvyklém postupu navrhování háku se pro celý hák zvolí konstantní teplota (např. jízková teplota + 100 °C). Tato hodnota je volena konzervativně, protože její podcenění může způsobit vážné problémy. Detailní znalost tepelných dějů v peci umožní přesnější určení průběhu teploty v háku. Snížením výpočtové teploty háku je možno výrazně snížit celkovou hmotnost háku.

Teplota háku není v celém jeho objemu stejná, dost výrazně se mění. Háček je ohříván jednak spaliny a jednak radičním zářením od plamenů. Z hlediska teplot lze těleso háku rozdělit do tří částí:

Ozařovaná část – je ohříván jednak přímo ozařováním od hořáku a jednak spaliny. Tato část háku má nejvyšší teplotu.

Stíněná část – není přímo ozařovaná hořákem, v porovnání s částí ozařovanou má nižší teplotu, je ohřívána převážně spaliny a pak vedením tepla z teplejších částí háku. Určitou roli zde hraje i radiace od teplejších částí pece, např. povrchu vyzdívky. Háček je stíněn jak samotnými trubkami, tak i jinými částmi háku. Hranice mezi ozařovanou a stíněnou částí není ostrá.

Izolovaná část – je část háku krytá vyzdívkou, má nejnižší teplotu. Háček je izolován asi z jedné třetiny. V těchto částech je ohříván pouze vedením tepla.

Celý háček je ochlazován převážně vedením tepla, které předává prostřednictvím kontaktu s pláštěm pece. Nezanedbatelný odvod tepla je i zářením samotného háku. Částečně je háček ochlazován na kontaktní ploše mezi chladnější trubicí a háčkem. Trubka je ochlazována proudícím médiem.

Určit rozložení teploty v háku je velmi komplikovaný úkol. Nicméně teplota má stěžejní vliv na optimalizaci tvaru háku.

8.1 Metoda konečných objemů

K zpřesnění rozložení teplot v háku, je nutné vyřešit rozložení teplot pro celou pec. Globální tepelnou bilanci pece, lze řešit pomocí empirických vzorců. K určení teploty háku je nezbytné rozložení teplot v peci vyřešit detailně, aby bylo možné určit lokální teploty v okolí háku.

V celkovém řešení rozložení teplot je zapotřebí zohlednit následující:

Radiace – je tepelné záření, které vyzařuje každá hmota teplejší než její okolí. Čím vyšší rozdíl teplot, tím vyšší je vyzařování.

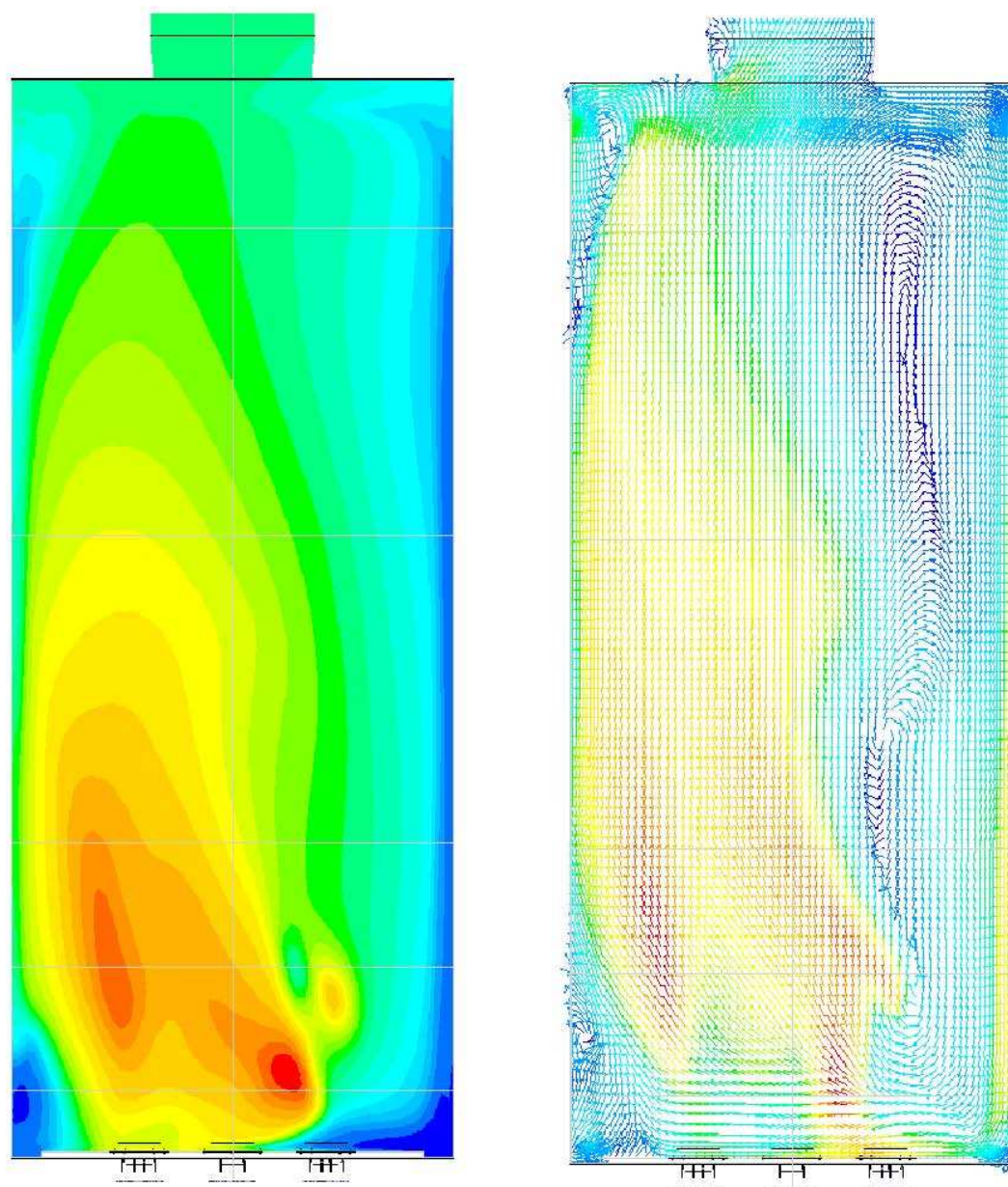
Kondukce – je vedení tepla v látce. Je to nejčastější způsob vedení tepla v pevných tělesech. S kondukcí je spojená veličina tepelná vodivost.

Konvekce – je proudění tekuté látky o rozdílné teplotě.

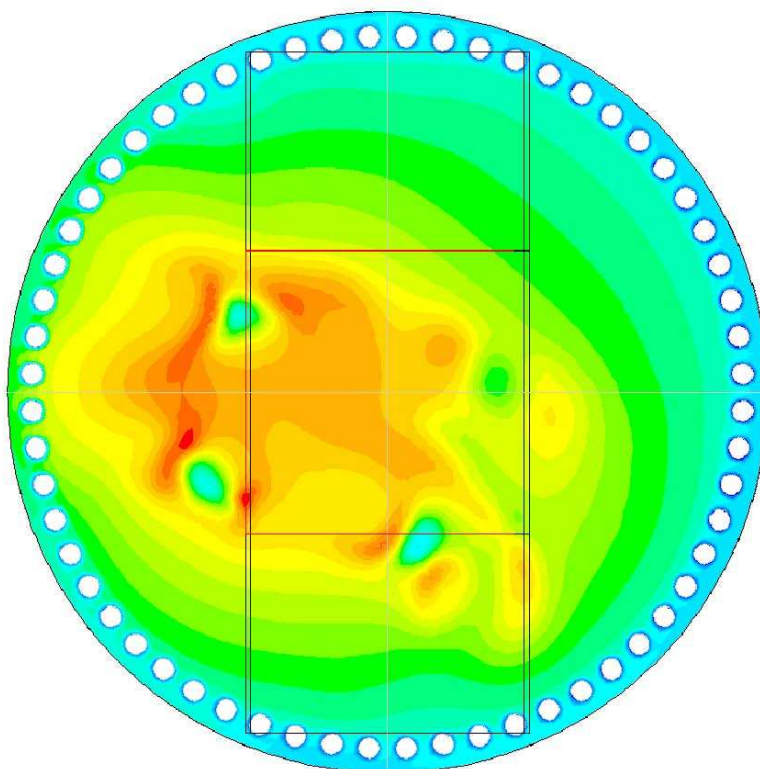
Pro výpočet lze použít některý z programů CFD. Programy CFD jsou založeny na metodě konečných objemů. Princip metody konečných objemů je podobný jako MKP s tím rozdílem že umí vhodně ošetřit konvekci (proudění).

Z výsledků programu CFD lze získat mnoho údajů, jako jsou třeba rozložení teplot média, spalin, potrubí, izolace, pláště, háků, součinitel přestupu tepla na povrch. Dále pak rychlost proudění a tlaky média a spalin (tlaková ztráta) a jiné.

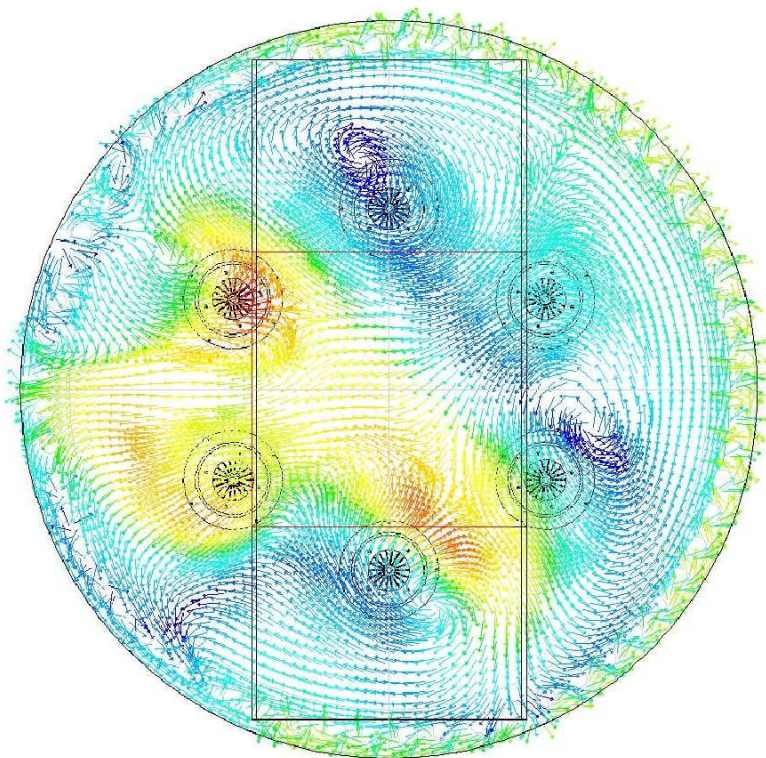
Programy CFD jsou také schopny znázorňovat proudnice – 3D trajektorie vybraných elementů. Viz obr. 37 až obr. 41.



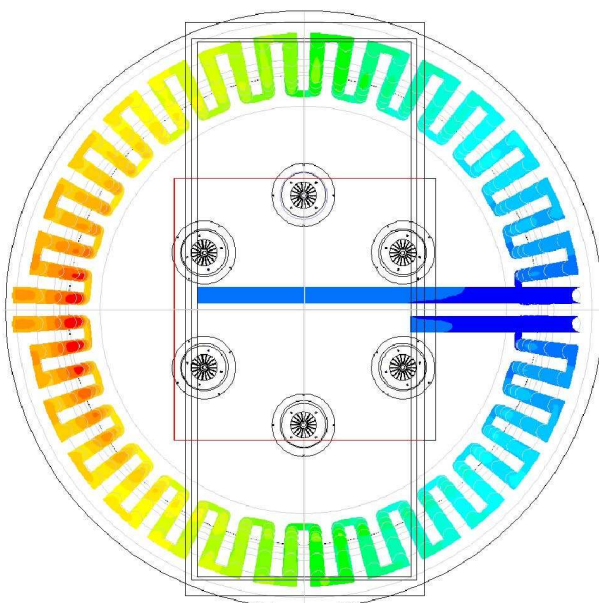
Obr. 37 Teplota a vektory rychlost spalin



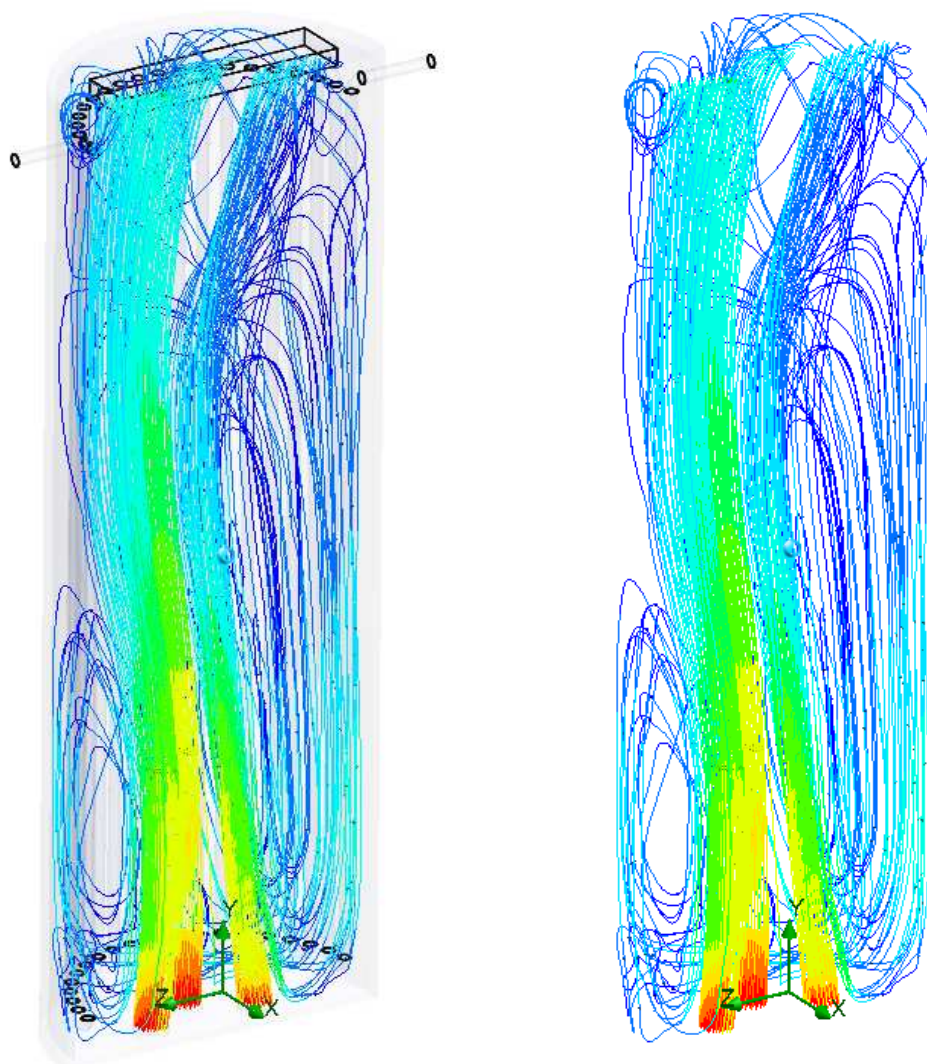
Obr. 38 Teplota v peci – půdorys



Obr. 39 Vektory rychlost proudění – půdorys



Obr. 40 Teplota potrubí – perspektivní půdorys



Obr. 41 Proudnice spalin

CFD programy mají svá omezení a specifika. Nutnou podmínkou získání správných výsledků jsou správné vstupní údaje zejména okrajové podmínky. Jejich přesné určení v tomto případě je poměrně obtížné. Taktéž není jednoduché zvolit všechny souvislosti tak, aby se výpočtový model blížil skutečné situaci. Všechny tyto aspekty vyžadují podrobné hluboké znalosti z dané problematiky a taktéž velmi dobré ovládání poměrně složitého programu. Je vhodné výpočtový model potvrdit údaji naměřenými na reálném modelu nebo ještě lépe na skutečném objektu, na peci. Z těchto důvodů nejsou v této diplomové práci předvedeny žádné konkrétní výsledky z programu CFD.

9 Metoda konečných prvků (MKP)

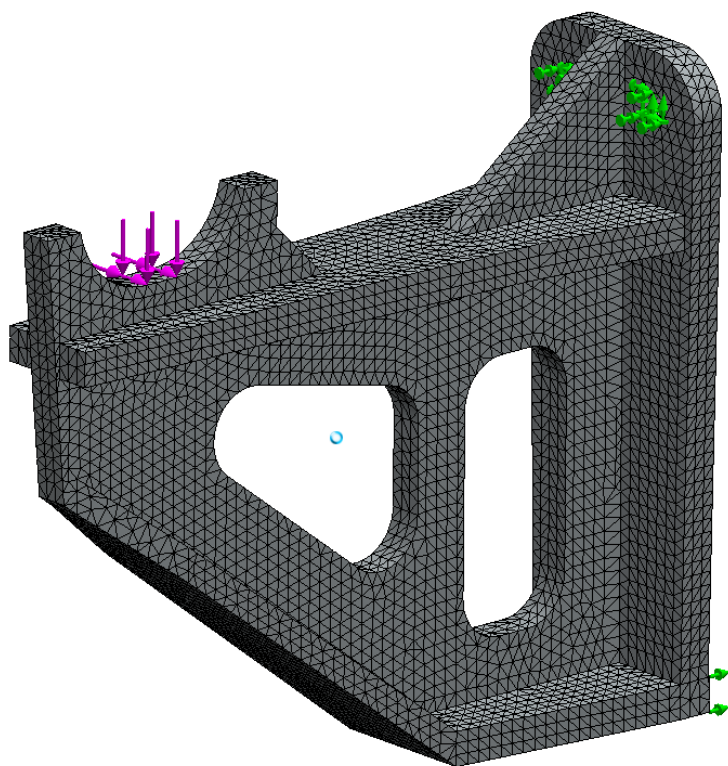
Tato metoda je použita pro porovnání napjatosti jednotlivých tvarů háků. Háky mají stejné připojovací rozměry, jsou i stejně zatíženy jak ve svislém tak vodorovném směru. Hmotnost mají velmi podobnou.

Tab. 11 Hmotnosti háků

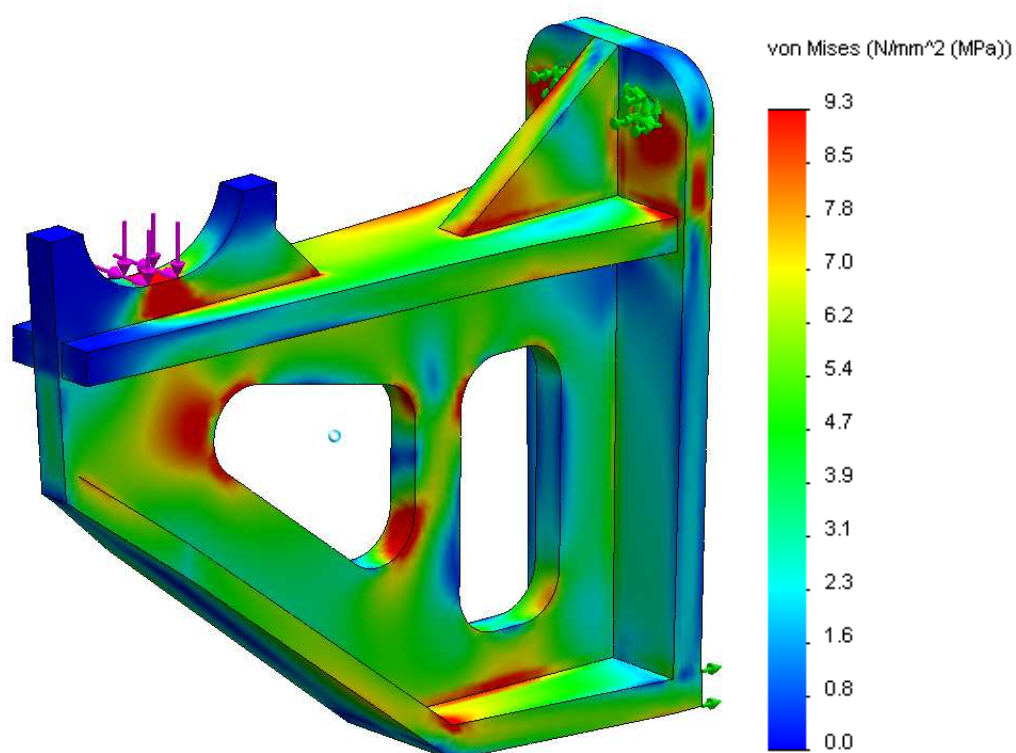
Typ háku	Hmotnost (kg)
1	11,59
2	11,46
3	11,62
4	11,61
5	11,58

K vůli zjednodušení je v následujícím porovnání použita jednoduchá statická analýza MKP. Pro konkrétní navrhování háku je však vhodnější při optimalizaci použít nelineární (creepovou) analýzu.

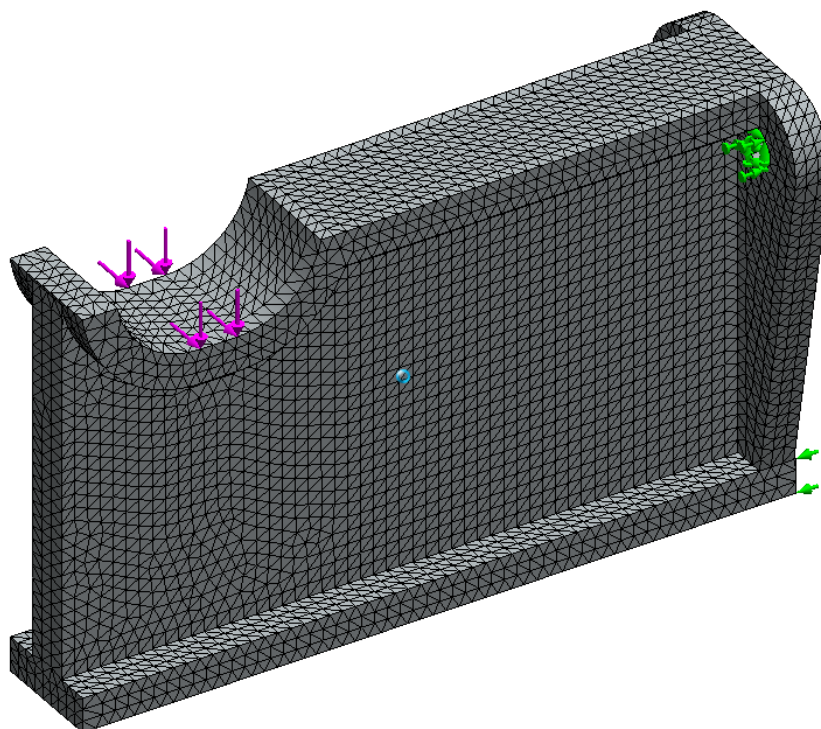
9.1 Porovnání háků prostřednictvím výsledků z MKP



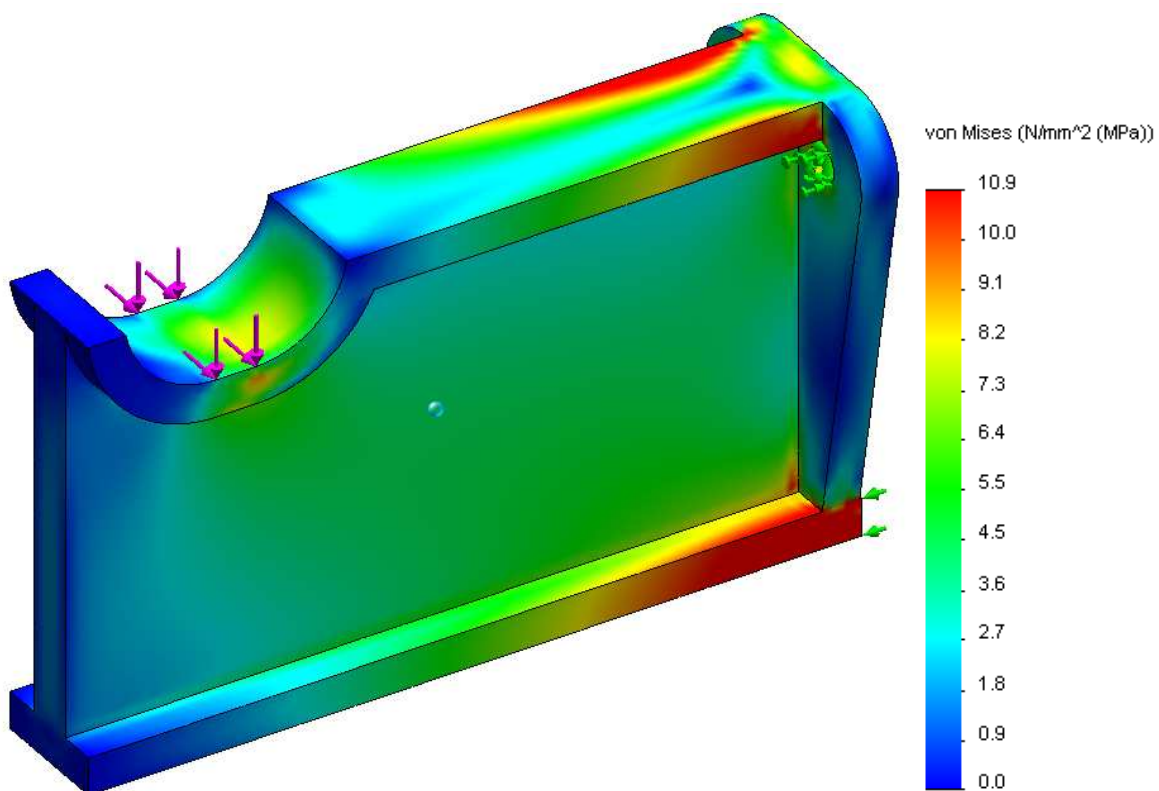
Obr. 42 Hák typ 1 – síť



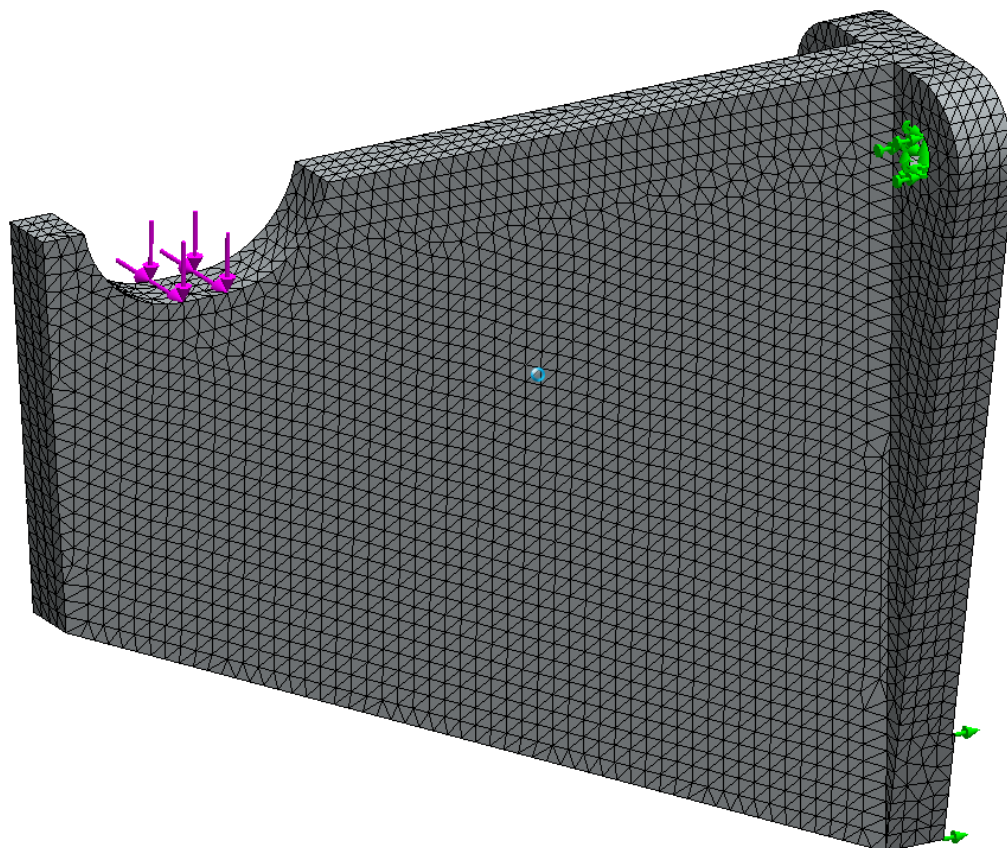
Obr. 43 Hák typ 1 – Napětí



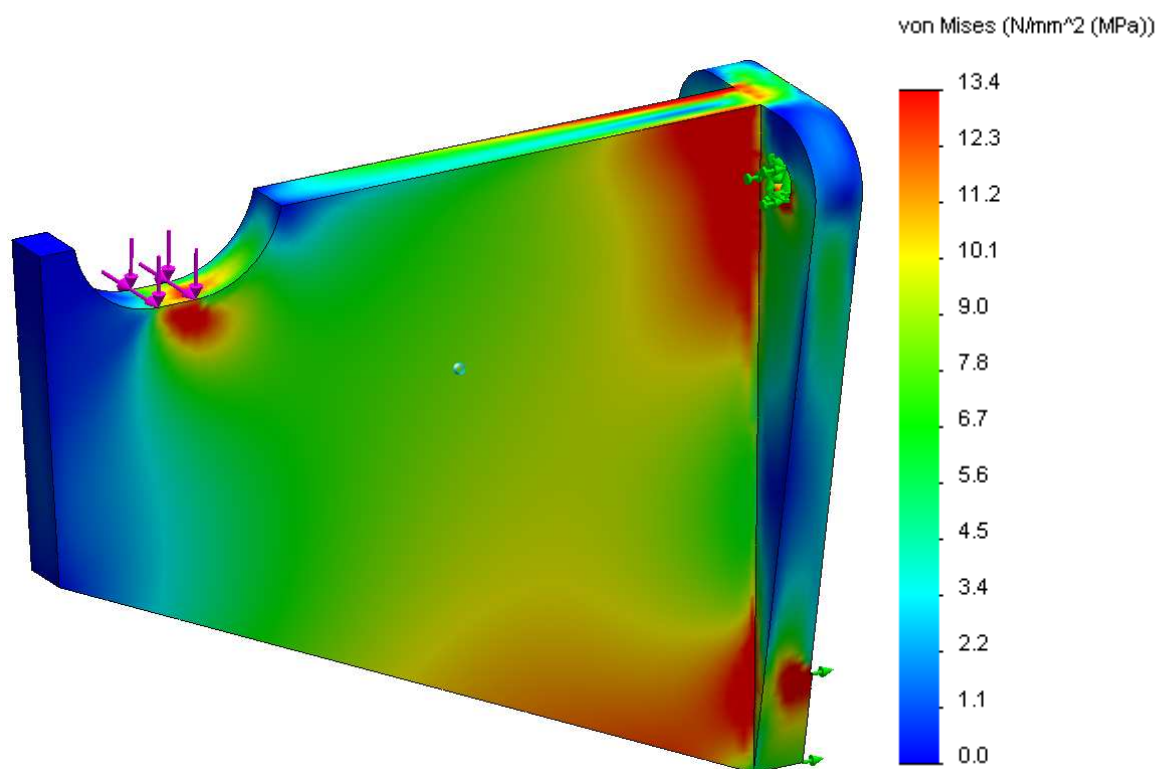
Obr. 44 Hák typ 2 – síť



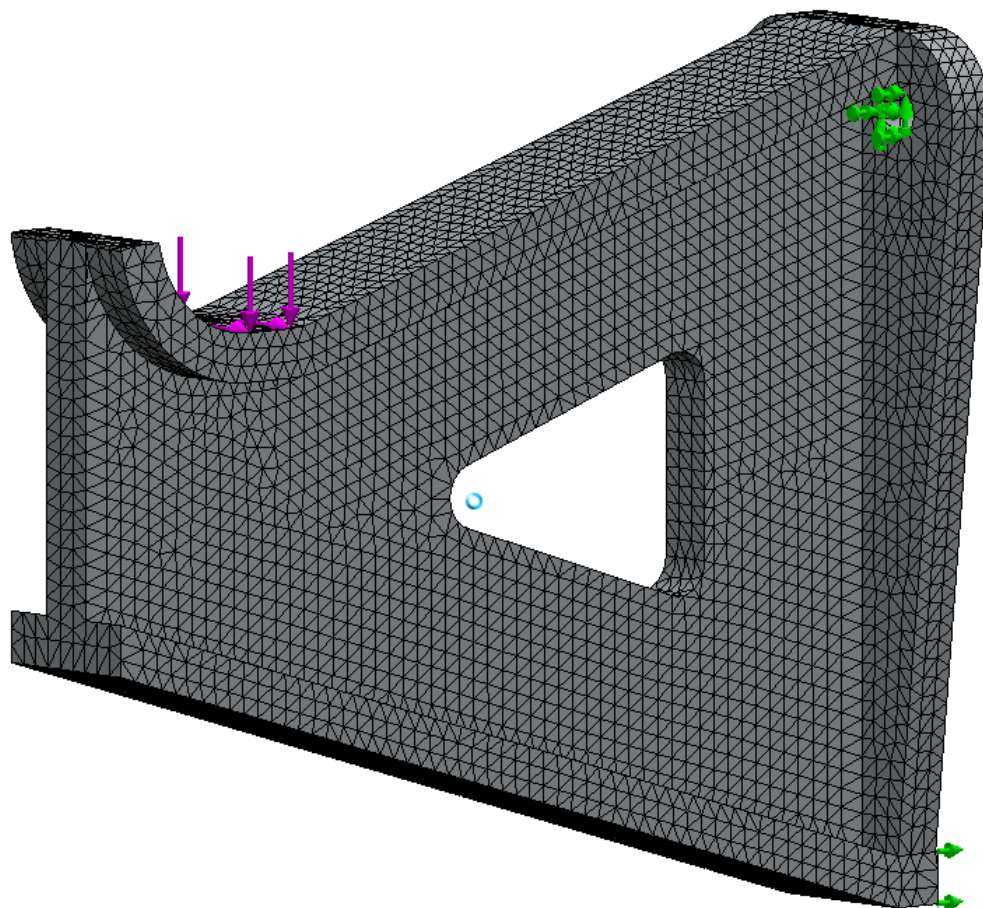
Obr. 45 Hák typ 2 – Napětí



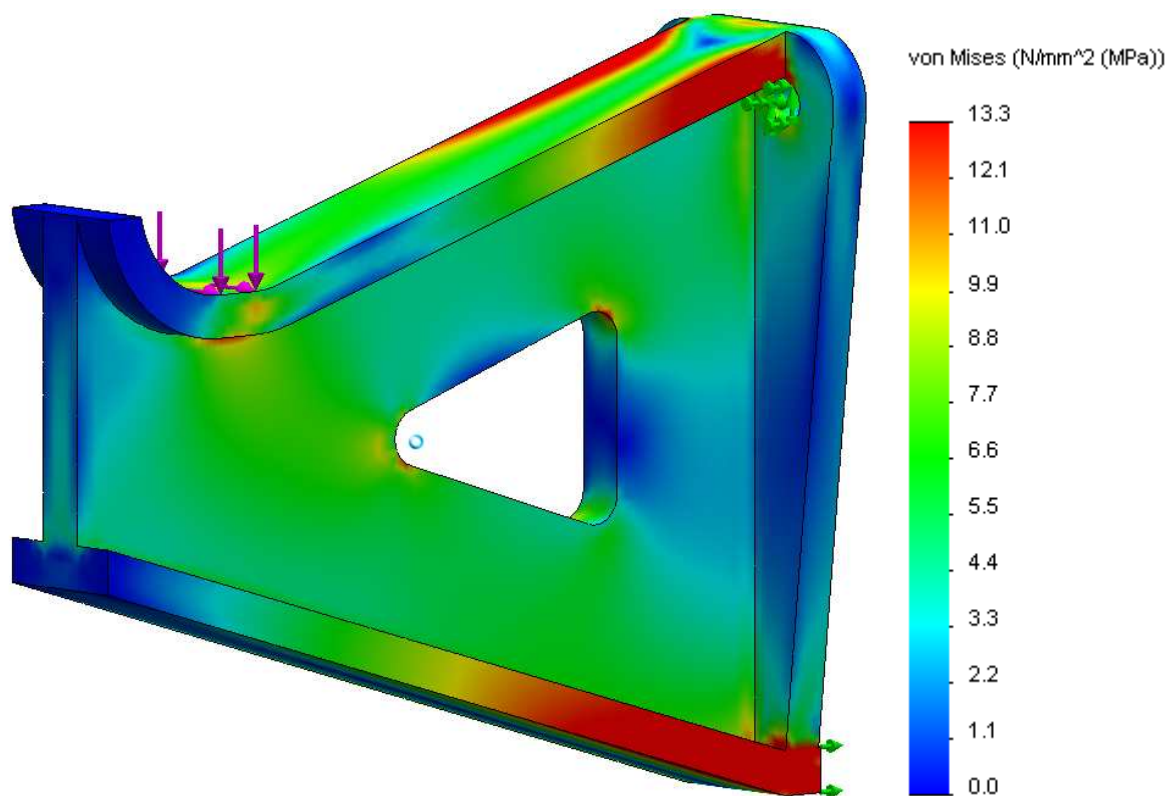
Obr. 46 Hák typ 3 – síť



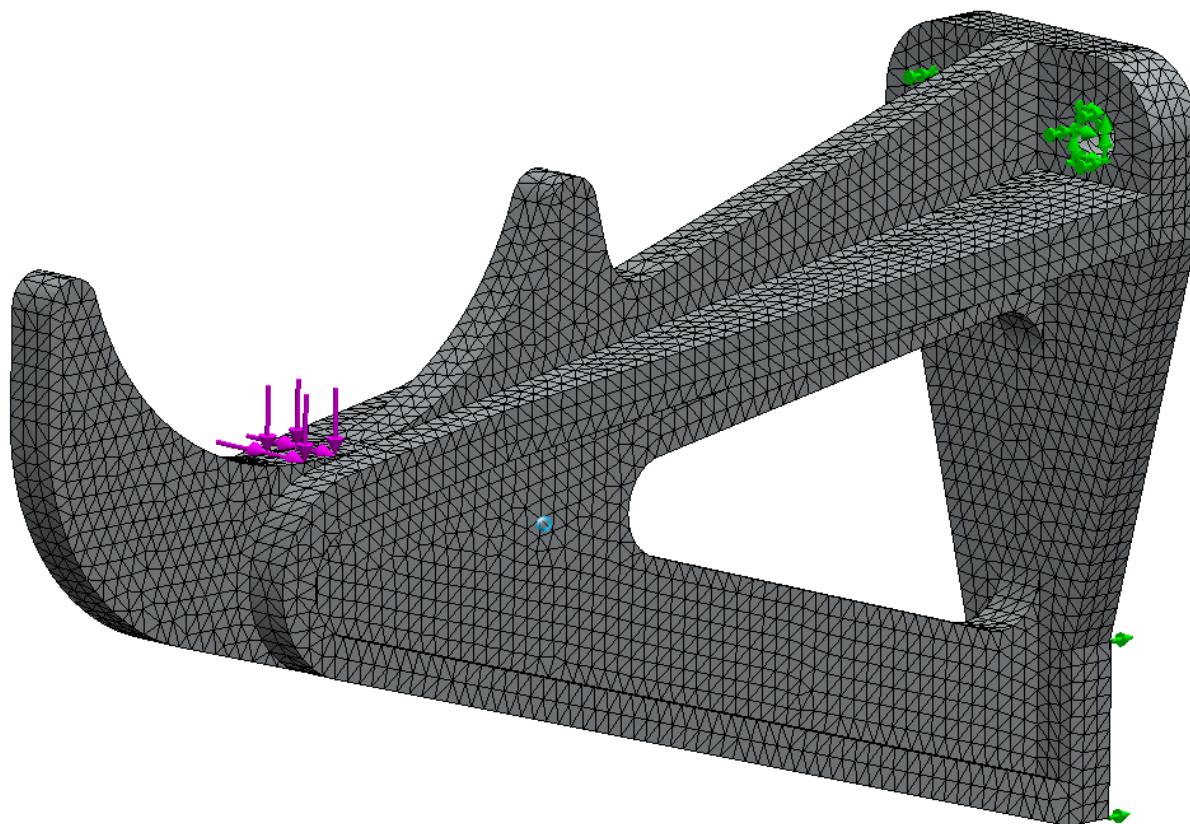
Obr. 47 Hák typ 3 – Napětí



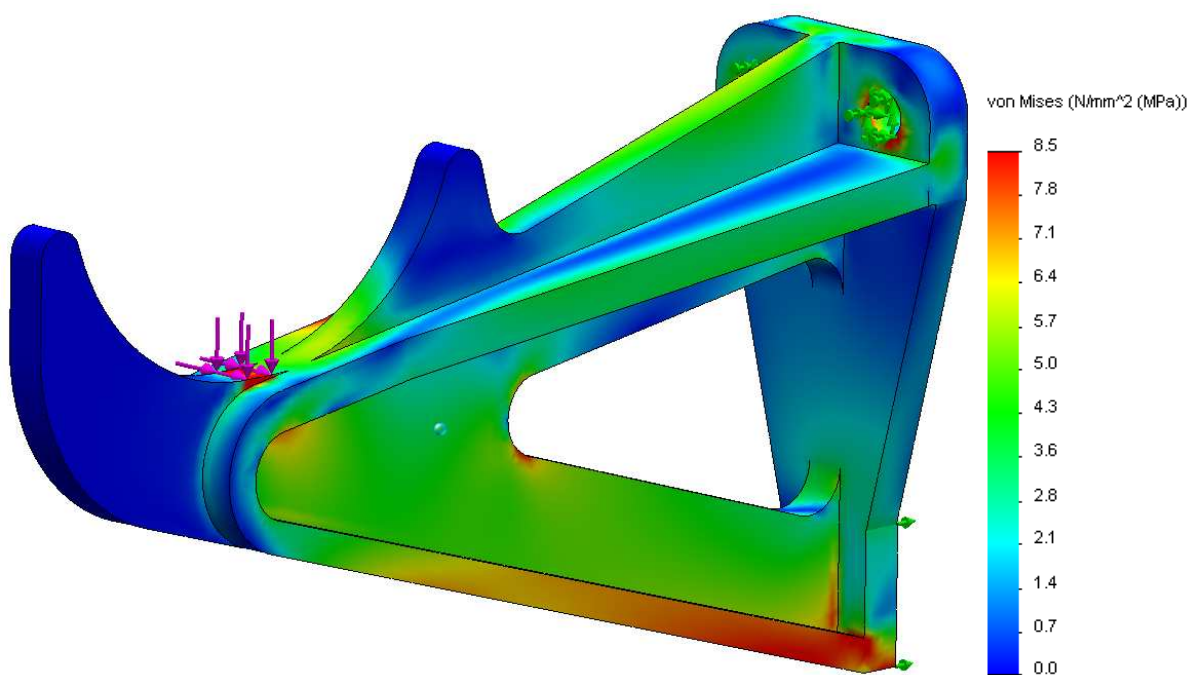
Obr. 48 Hák typ 4 – Napětí



Obr. 49 Hák typ 4 – Napětí



Obr. 50 Hák typ 5 – Napětí



Obr. 51 Hák typ 5 – Napětí

Tab. 12 Napětí háků

Typ háku	Napětí (MPa)
1	9,3
2	10,9
3	13,4
4	13,3
5	8,5

9.2 Vyhodnocení výsledků MKP

Programy MKP poskytují různé výsledky napjatosti dle různých teorií, smykové, normálové napětí, posuvy, deformace a jiné. To ale samo osobě neřekne, jestli je kontrolovaná součást vyhovující nebo ne. V některých programech MKP jsou tzv. postprocesory, které takové vyhodnocení provádějí. Vyhodnocení lze provádět různými způsoby.

V případě že teplota součásti je v oblasti mimo tečení materiálu („pod creepem“).

Elasticky – napětí může několikrát překročit mez kluzu. Deformace dle Hookova zákona.

Plasticky – při překročení meze kluzu dojde k trvalé plastické deformaci, součást změní svůj tvar a napětí se přerozdělí.

U elastického přístupu se ve vyhodnocení používá tzv. **Kategorizace napětí**. Ta rozděluje napětí na tři kategorie:

- 1. kategorie** – primární napětí, membránové, rovnoměrně rozložené v celém průřezu. Tato kategorie nesmí přesáhnout dovolené napětí.
- 2. kategorie** – Primární membránové, membránové lokální a primární ohybové napětí nesmí přesáhnout jeden a půl násobek dovoleného namáhání
- 3. kategorie** – Primární membránové, membránové lokální, primární ohybové, diskontinuitní a základní teplotní napětí nesmí přesáhnout trojnásobek dovoleného namáhání.

Jestliže je teplota součásti v oblasti tečení materiálu, provádí se výpočet dvojitým způsobem

Pseudoelasticky – zjistí se napětí a to se porovná s dovolenými hodnotami pro creep podobně jako v kategorizaci napětí.

Creepová deformace – přírůstkovou metodou s časově omezenými bloky se zatíží součást. Simuluje se pak celková doba provozu. Jako výsledek je trvalá poměrná deformace. Deformace odpovídající jednotlivým kategoriím se porovnají s přípustnými hodnotami.



10 Závěr

Pro optimalizaci háků v pecích petrochemického průmyslu je nutné znát detailní informace z mnoha oborů. Matematika, pružnost a pevnost, vlastnosti materiálů, termomechanika, proudění tekutin a jiné. Mezioborové znalosti kladou na zpracovatele značné nároky. V případě použití programů CFD jsou velmi vysoké nároky i na výpočetní techniku.

Obvyklý způsob navrhování háků se jeví jako zcela nevhodný. Proto jsou navrženy nové dva způsoby. Pro částečnou optimalizaci lze využít i relativně jednoduchých prostředků analytického výpočtu, jak je ukázáno v metodě konečných řezů. Pro přesnější optimalizaci je však nutné použití numerických výpočtu.

Jelikož hák je součást, která má mnoho parametrů, nelze jej navrhnout třeba jako tloušťku stěny trubky dle jednoduchého vzorce. Geometrie i jednotlivé dimenze se musí odhadnout a pak pomocí nových metod spočítat. Po té je nutné oslabená místa posílit a výpočet provést znovu. Porovnáním původních a nových výsledků zhodnotit, zda-li provedená úprava byla vhodná či nikoli. Tento postup opakovat tak dlouho, dokud nebudou výsledky uspokojivé. Velkým pomocníkem je v tomto případě koeficient využití.

Nové metody spolehlivě zodpovídají položenou otázku v úvodu, zda-li hák bezpečně plní svoji funkci. Na otázku ekonomickou nelze tak jednoduše odpovědět. Je pravděpodobné, že je stále možné snižování hmotnosti.

Všechny nastíněné problémy bránící úplné optimalizaci zatím nejsou uspokojivě vyřešeny. Obzvláště pak určení teplotního rozložení a určení správného zatížení háku, která skýtají největší potenciál pro optimalizaci. To poskytuje další prostor pro inženýrskou i vědeckou činnost v oblasti optimalizace tvaru háků v pecích petrochemického průmyslu.



11 Seznam Literatury

- [1] Kadrnožka J.: Tepelné elektrárny a teplárny, SNTL, Praha 1982
- [2] Schneider P.: Základy konstruování procesních zařízení, PC-DIR Real, s.r.o., Brno 1999
- [3] ČSN EN 12 952 - Vodotrubné kotle a pomocná zařízení
- [4] ANSI/API Standart 560 Fired Heaters for General Refinery Service, API, Washington 2007
- [5] API Standart 530 Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries, API, Washington 2003
- [6] 2004 ASME Boiler and Pressuere Vessel Code, Subsection III, Division 1, Subsection NH - Class 1 Components in Elevated Temperature Service, ASME, New York 2005
- [7] Boyle J. T., Spence J.: Stress Analysis for Creep, London 1983
- [8] Podešva L.: Tepelná technika v průmyslových závodech, Praha 1952
- [9] Smandry J.: Vliv provozních podmínek na vlastnosti materiálů trubkových pecí zpracovávajících ropu a uhlovodíky, Litvínov 1981
- [10] Studie spalování plynného paliva v peci, Kralupy 2007
- [11] Němec J.: Tuhost a pevnost ocelových částí, Praha 1963



12 Seznam použitých veličin

Tab. 13 Seznam použitých veličin

Symbol	Název	Jednotka
a	Výška háku	mm
b	Šířka oblasti v analyzované hranici	mm
b_1	Šířka oblasti 1	mm
b_2	Šířka oblasti 2	mm
b_{21}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{22}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{23}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{24}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{2a}	Šířka podoblasti 2a	mm
b_{2b}	Šířka podoblasti 2b	mm
b_{2c}	Šířka podoblasti 2c	mm
b_3	Šířka oblasti 3	mm
b_5	Šířka oblasti 5	mm
b_6	Šířka oblasti 6	mm
b_{61}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{62}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{63}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
b_{6a}	Šířka podoblasti 6a	mm
b_{6b}	Šířka podoblasti 6b	mm
c_1	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
c_2	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
c_3	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
c_4	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
c_6	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
c_a	Zkosení horní hrany odlehčovacího otvoru 1	mm
e_s	Tloušťka svislých řezů	mm
e_v	Tloušťka vodorovných řezů průřezových ploch	mm
F	Síla zatěžující hák	N
h_{11}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
h_{12}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
h_{13}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
h_{14}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
h_{1a}	Výška podoblasti 1a	mm
h_{1b}	Výška podoblasti 1b	mm
h_{1c}	Výška podoblasti 1c	mm
h_{1d}	Výška podoblasti 1d	mm
h_{1e}	Výška podoblasti 1e	mm
h_{1f}	Výška podoblasti 1f	mm
h_{3a}	Výška podoblasti 3a	mm
h_{3b}	Výška podoblasti 3b	mm
h_{3c}	Výška podoblasti 3c	mm
h_{3d}	Výška podoblasti 3d	mm
h_{3e}	Výška podoblasti 3e	mm



Symbol	Název	Jednotka
h_{3f}	Výška podoblasti 3f	mm
h_{3g}	Výška podoblasti 3g	mm
h_{3h}	Výška podoblasti 3h	mm
h_{3i}	Výška podoblasti 3i	mm
h_{5a}	Výška podoblasti 5a	mm
h_{5b}	Výška podoblasti 5b	mm
h_{5c}	Výška podoblasti 5c	mm
h_{5d}	Výška podoblasti 5d	mm
h_{5e}	Výška podoblasti 5e	mm
h_{5f}	Výška podoblasti 5f	mm
h_{5g}	Výška podoblasti 5g	mm
h_{5h}	Výška podoblasti 5h	mm
h_{5i}	Výška podoblasti 5i	mm
h_{5sa}	Výška podoblasti 5sa	mm
h_{5sb}	Výška podoblasti 5sb	mm
h_{6a}	Výška podoblasti 6a	mm
h_{6b}	Výška podoblasti 6a	mm
h_{h1}	Horní výška oblasti 1	mm
h_{h2}	Horní výška oblasti 2	mm
h_{h3}	Horní výška oblasti 3	mm
h_{h5}	Horní výška oblasti 5	mm
h_{h6}	Horní výška oblasti 6	mm
h_{s1}	Spodní výška oblasti 1	mm
h_{s2}	Spodní výška oblasti 2	mm
h_{s3}	Spodní výška oblasti 3	mm
h_{s5}	Spodní výška oblasti 5	mm
h_{s6}	Spodní výška oblasti 6	mm
h_T	Výška těžiště plochy průřezu	mm
i	Číslo roviny průřezu	mm
I_z	Kvadratický moment plochy průřezu	mm ⁴
I_{z1}	Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 1	mm ⁴
I_{z2}	Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 2	mm ⁴
I_{z3}	Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 3	mm ⁴
I_{z5}	Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 5	mm ⁴
I_{z6}	Kvadratický moment plochy průřezu oblasti 6	mm ⁴
k_s	Součinitel bezpečnosti	
k_v	Koeficient využití	
l	Délka ramene	mm
l_1	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{11}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{12}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{13}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{14}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{15}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{1a}	Délka podoblasti 1a	mm
l_{1b}	Délka podoblasti 1b	mm



Symbol	Název	Jednotka
l_{1c}	Délka podoblasti 1c	mm
l_{1d}	Délka podoblasti 1d	mm
l_{1e}	Délka podoblasti 1e	mm
l_{1f}	Délka podoblasti 1f	mm
l_2	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{21}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{22}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{23}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{2a}	Délka podoblasti 2a	mm
l_{2b}	Délka podoblasti 2b	mm
l_{2c}	Délka podoblasti 2c	mm
l_3	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_4	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_5	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{51}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{5a}	Délka podoblasti 5b	mm
l_{5b}	Délka podoblasti 5c	mm
l_{61}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{62}	Vzdálenost viz obr. 13 Parametrické schéma háku	mm
l_{6ah}	Délka podoblasti 6ah	mm
l_{6bh}	Délka podoblasti 6bh	mm
l_{6ab}	Délka podoblasti 6ab	mm
l_{6bb}	Délka podoblasti 6bb	mm
l_a	Délka podoblasti 3a a 5a	mm
l_b	Délka podoblasti 3b	mm
l_c	Délka podoblasti 3c	mm
l_d	Délka podoblasti 3d a 5d	mm
l_e	Délka podoblasti 3e a 5e	mm
l_f	Délka podoblasti 3f a 5f	mm
l_g	Délka podoblasti 3g a 5g	mm
l_h	Délka podoblasti 3h a 5h	mm
l_i	Délka podoblasti 3i a 5i	mm
M_o	Ohybový moment háku	N mm
M_s	Statický moment plochy průřezu	mm ³
M_{s1}	Statický moment plochy průřezu oblasti 1	mm ³
M_{s2}	Statický moment plochy průřezu oblasti 2	mm ³
M_{s3}	Statický moment plochy průřezu oblasti 3	mm ³
M_{s5}	Statický moment plochy průřezu oblasti 5	mm ³
M_{s6}	Statický moment plochy průřezu oblasti 6	mm ³
M_{sh1}	Statický moment plochy nad spodní hranici oblasti 1 vůči těžišti	mm ³
M_{sh2}	Statický moment plochy nad spodní hranici oblasti 2 vůči těžišti	mm ³
M_{sh3}	Statický moment plochy nad spodní hranici oblasti 2 vůči těžišti	mm ³
M_{sh5}	Statický moment plochy nad spodní hranici oblasti 5 vůči těžišti	mm ³
M_{sh6}	Statický moment plochy nad spodní hranici oblasti 6 vůči těžišti	mm ³
$M_{s(h)1}$	Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 1	mm ³



Symbol	Název	Jednotka
$M_{s(h)2}$	Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 2	mm ³
$M_{s(h)3}$	Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 3	mm ³
$M_{s(h)5}$	Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 5	mm ³
$M_{s(h)6}$	Statický moment plochy, nad analyzovanou hranicí, která leží v oblasti 6	mm ³
n	Počet analyzovaných rovin	
p	Výška stojny	mm
r	Poloměr zaoblení odlehčovacích otvorů	mm
R_u	Poloměr uložení	mm
S	Plocha průřezu	mm
S_1	Plocha průřezu oblasti 1	mm
S_2	Plocha průřezu oblasti 2	mm
S_3	Plocha průřezu oblasti 3	mm
S_5	Plocha průřezu oblasti 5	mm
S_6	Plocha průřezu oblasti 6	mm
$s_1(h)$	Pomocná oblast 1	mm
$s_2(h)$	Pomocná oblast 2	mm
$s_3(h)$	Pomocná oblast 3	mm
$s_5(h)$	Pomocná oblast 5	mm
$s_6(h)$	Pomocná oblast 6	mm
T	Teplota	°C
v	Vyložení háku	mm
z_1	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 1, 3, 5	mm
z_2	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 1, 3, 5	mm
z_3	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 2	mm
z_4	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 2	mm
z_5	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 6	mm
z_6	Hranice průřezu háku v rovině „zy“ oblasti 6	mm
σ_d	Dovolené namáhání	MPa
σ_o	Ohybové napětí	MPa
σ_{red1}	Redukované napětí dle maximálních smykových napětí	MPa
σ_{red2}	Redukované napětí dle HMH	MPa
τ	Smykové napětí	MPa

Pozn.:

Veličiny psané „stojatě“ jsou vstupní zadávací parametry.

Veličiny psané „kurzívou“ nabývají funkčních hodnot.